

УДК 524.8+[530.12:531.51]

ЭКСКУРС В СОВРЕМЕННУЮ КОСМОЛОГИЮ

Б. М. Барбашов, В. Н. Первушин, Д. В. Проскурин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	138
КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ КОСМОЛОГИИ	140
КОСМОЛОГИЯ НЬЮТОНА	141
ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОСМОЛОГИЯ	143
НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОСМОЛОГИЯ ФРИДМАНА	144
УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА–ФРИДМАНА	152
ПРОБЛЕМА, СВЯЗАННАЯ С ВЕЛИЧИНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ	154
КОСМИЧЕСКИЙ ФОН МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	158
ПРОИСХОЖДЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ	160
ЕЩЕ О ПРОБЛЕМАХ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ	161
ИНФЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ИЛИ СЦЕНАРИЙ БЫСТРО РАЗДУВАЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ	163
БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ	168
НОВЕЙШИЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ КОСМОЛОГИИ И ТРУДНОСТИ ИХ ОБЪЯСНЕНИЯ	170
КОНФОРМНАЯ СИММЕТРИЯ КАК НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМАМ КОСМОЛОГИИ	172
РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КВАНТОВЫЙ МИР	177
КОНФОРМНАЯ КОСМОЛОГИЯ	180
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ ВСЕЛЕННОЙ	182
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	187

УДК 524.8+[530.12:531.51]

ЭКСКУРС В СОВРЕМЕННУЮ КОСМОЛОГИЮ

Б. М. Барбашов, В. Н. Первушин, Д. В. Проскурин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Предлагаемая статья не претендует на полноту охвата нерешенных проблем, возникающих в современной космологии, но представляет собой скорее краткий обзор некоторых основных монографий и статей в научных журналах. Нашей целью было дать общее представление о предмете для тех, кто, может быть, впервые знакомится с этим разделом физики, и охарактеризовать основной круг проблем в этой области. Мы старались использовать минимально необходимый математический аппарат и предполагаем у читателя лишь знание ньютоновской теории тяготения и элементов общей теории относительности Эйнштейна.

The review proposed does not pretend to the completeness of unsolved problems, under consideration at the present moment in the modern cosmology, but to be a brief review of some basic monographs and papers in scientific journals. The aim of the work is to adumbrate about the subject for those, who get to know about this area for the first time and to describe the basic problems in the area. We tried to use the minimum mathematical tool and suppose just the basic knowledge of the Newton theory of gravitation and basics of General Relativity for the reader.

ВВЕДЕНИЕ

Физика есть наука о той части нашего мира, которая измеряется приборами, созданными человеком, а космология — это наука об измерении физических характеристик космических объектов. Накопленные с древнейших времен и теоретически интерпретируемые в рамках современных физических теорий пространства, времени и материи, эти данные позволяют построить ту или иную модель космической эволюции Вселенной в целом [1–14].

С момента зарождения современной науки в XVI–XVII вв. физики и астрономы вновь и вновь возвращались к проблеме эволюции Вселенной, однако подобные исследования имели вплоть до 20-х гг. XX в. зыбкую основу, поскольку изучение ранней Вселенной существенно затруднялось тогда отсутствием адекватного наблюдательного и теоретического материала, который позволял бы реконструировать ее историю [5].

Космология как раздел науки о природе должна иметь определенную экспериментальную базу, и такая база у современной космологии, конечно, имеется, но пока трудно судить о полноте наблюдательных данных, необходимых для построения обоснованной теории, поскольку земная цивилизация в течение своего существования занимает ничтожно малый отрезок времени по

сравнению с временем существования Вселенной. Сегодня мы имеем возможность получить информацию лишь о ее ограниченной части, следовательно, речь идет о построении теории на основе наблюдательного материала, относящегося только к некоторой части Вселенной, поэтому без привлечения гипотез построение космологических теорий невозможно. При этом, например, имеется в виду не гипотеза об однородном и изотропном распределении материи в крупномасштабном объеме, из которой исходят в большинстве моделей, а допущение о том, что Вселенная везде должна быть такой, какая она есть в ее доступной нашему наблюдению части, и предполагается, что законы современной физики во всей Вселенной должны быть одинаковыми.

Как известно, современная физика выросла из двух основополагающих начал — ньютоновской механики частицы и фарадеевского поля. В первой решении уравнения движения предсказывают эволюцию по времени координат частицы, если заданы ее начальные положение и скорость, при этом понятия времени и пространства абсолютизированы: пространство евклидово, а время везде течет одинаково. Здесь уместно вспомнить утверждение Лапласа: «Дайте мне начальные данные, и я объясню весь мир». Фарадеем были сделаны первые шаги к созданию физики полей (электромагнитного поля). Как выдающийся экспериментатор, он последовательно обосновывал и развивал концепцию полевой природы сил между телами. Наверное, поэтому первая статья Максвелла, который, по образному выражению Герца, «одел» результаты Фарадея в аристократические одежды математики, называлась «О силовых линиях Фарадея». Теория Максвелла оказалась столь же всеобъемлющей в области электромагнитных явлений, как и теория Ньютона для движения материальных тел, в том числе и небесных.

Эти теории и составили в то время фундамент для исследований в космологии. Однако, как отмечал известный космолог С. В. Хокинг [2], на рубеже XIX–XX вв. космология еще рассматривалась как теория с оттенком псевдонауки, и для этого были тогда свои основания. Во-первых, почти полностью отсутствовали вполне достоверные наблюдательные данные — до 20-х гг. XX в. абсолютно надежным фактом был только тот, что небо ночью темное (см. далее обсуждение парадокса Ольберса). Во-вторых, более серьезной проблемой было то, что теория возникновения и развития Вселенной нуждается в каких-либо предположениях относительно начальных данных, без которых можно только сделать тривиальное утверждение, что Вселенная сегодня такая потому, что у нее были предпосылки к этому в предыдущей истории. А это уже означает, что *a priori* мы кладем в основание нашей теории антропный принцип, согласно которому Вселенная со всеми ее фундаментальными константами и массами, какие они есть сейчас, такая потому, что если бы она была другой, то не было бы того, кто задает этот вопрос.

Начиная с пионерских работ Фридмана [1] и заканчивая последними работами по инфляционной модели сценария горячей Вселенной, все наблю-

дательные данные рассматриваются в космологии как свидетельства расширяющейся Вселенной, и этот вывод основан на общей теории относительности (ОТО) и стандартной модели (СМ) элементарных частиц, построенных по образу и подобию электродинамики Фарадея–Максвелла и в согласии с представлениями Фарадея о полевой природе материи и единстве всех сил природы.

Именно эти идеи стали основанием для эйнштейновской теории гравитации и в конечном итоге для всех физических теорий XX в. по физике элементарных частиц и космологии.

В настоящее время получены новые астрофизические данные, которые рассматривают как революцию в космологии. В частности, совокупность измерений зависимости красных смещений спектральных линий атомов на космических объектах от их расстояния до Земли [15] и новые данные [16, 17] для больших значений красного смещения свидетельствуют о том, что наша Вселенная заполнена в основном не массивной материей далеких и потому невидимых галактик, а загадочным веществом совершенно другой природы, с другим уравнением состояния, названным квинтэссенцией [18]. Результаты измерения распределения химических элементов во Вселенной свидетельствуют об уравнении состояния материи в эпоху первичного нуклеосинтеза и о ничтожно малом вкладе видимой барионной материи (около 4 %) в космическую эволюцию [8, 19]. Результаты измерения параметров реликтового излучения с температурой 2,7 К, оставшегося после отделения вещества от радиации при красных смещениях $z \sim 1100$, дают информацию об эволюции ранней Вселенной [20]. Все это заставляет в очередной раз заново рассмотреть наши научные представления о Вселенной и тенденции развития этих представлений.

Настоящий обзор посвящен описанию эволюции наших представлений о Вселенной в целом в контексте новых астрофизических данных и попыткам объяснения этих данных в современной теории. Вначале мы кратко остановимся на истории развития астрономических наблюдений до 20-х гг. прошлого столетия, когда считали, что Вселенная вечна, безгранична и стационарна.

1. КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ КОСМОЛОГИИ

Дотелескопическая астрономия, начиная с «Системы мира» Птолемея (140 г. н. э.), определившей развитие научной мысли на последующие 14 столетий, и включая труд Коперника «Об обращениях небесных сфер» (1543 г.), имела дело лишь с Солнечной системой, а видимые невооруженным глазом звезды помещались на воображаемую неподвижную сферу. Даже И. Кеплер в своей книге «Сокращение коперниковой астрономии» (1620 г.) хотя и с

оговорками, но все-таки помещал Солнце в центр «твердой звездной сферы» с расстоянием до нее в 60 млн земных радиусов (радиус Земли $\sim 6,3 \cdot 10^9$ км, следовательно, до такой сферы было около $4 \cdot 10^{11}$ км). По современным данным, расстояние от Земли до Солнца $1,5 \cdot 10^8$ км, а от Земли до ближайшей звезды порядка 1,3 пк (1 пк = 3,26 св. лет $\simeq 3 \cdot 10^{13}$ км), поэтому сфера Кеплера была в 100 раз ближе к Земле, чем ближайшая к нам звезда.

О бесконечности пространства Вселенной и о бесконечном числе звезд в ней писали уже в эпоху Возрождения, в частности Николай Кузанский (1401 г.), Томас Дигс (1576 г.) и Джордано Бруно (1584 г.). С открытием закона всемирного тяготения Ньютона (1685 г.) небесная сфера, вероятно, стала казаться фантастической идеей, несовместимой с этим законом.

Телескопическая астрономия, начало которой в 1608 г. положил Галилей изобретением телескопа, и он же впервые увидел, что Млечный Путь состоит из звезд (размер Млечного Пути ~ 30 кпк $\sim 10^{18}$ км), не противоречила бесконечности Вселенной. К началу XIX в. прежде всего наблюдениями Вильяма Гершеля были обнаружены другие галактики со средним расстоянием между ними в 10^6 пк.

XX в. — это время бурного развития внегалактической астрономии с представлением о бесконечно большом числе галактик и их равномерном заполнении Вселенной. Поэтому естественным стало восприятие Вселенной как бесконечной и стационарной, в которой Солнце и наша Галактика не занимают какое-либо выделенное положение. В связи с этим упомянем историческую дискуссию астрономов Шепли и Куртиса о природе спиральных туманностей, происходившую уже в 20-х гг. XX в. Шепли считал, что существует только одна островная вселенная — наша Галактика, а все спиральные туманности являются объектами внутри нее. Куртис же (а прежде него Эммануил Кант) считал, что спиральные туманности являются островными вселенными. Эту дискуссию надо считать последним проявлением геоцентризма, замаскированного под галактоцентризм.

Построение огромных телескопов и работы Хаббла привели к окончательному решению этого вопроса — спиральные туманности действительно представляют собой другие галактики, а Вселенная заполнена «островами» галактик. Именно они, а не звезды представляют собой основные составляющие материи, с которыми астрономы должны иметь дело, когда речь идет о Вселенной как о едином объекте исследования.

2. КОСМОЛОГИЯ НЬЮТОНА

До создания ОТО Эйнштейном (1915 г.) модели статической и бесконечной Вселенной строились на основе механики Ньютона и геометрии Евклида, но они сразу же столкнулись с рядом проблем и трудностей при объяснении даже имевшихся тогда скудных наблюдательных фактов.

Одной из таких трудностей была загадка темного неба при заходе Солнца, или так называемый фотометрический парадокс Ольберса (1826 г.) [3, 4, 21]. На самом деле этот парадокс был впервые установлен еще Галлеем в 1720 г. и Шизо в 1793 г. и связан с самым древним, как уже отмечалось во введении, астрономическим наблюдением — темным небом ночью.

Парадокс прост и в то же время поучителен, он сразу же отвергает наивную космологию бесконечной евклидовой и неизменной во времени Вселенной, при условии что она равномерно заполнена звездами, имеющими одинаковую среднюю светимость l . Если это так, то, пренебрегая поглощением света самими звездами, получим, что светимость удаленной от нас на расстояние r звезды будет равна $l/4\pi r^2$, плотность таких звезд в единице объема есть постоянная величина n , а число звезд, находящихся в шаровом слое, ограниченном сферами с радиусами r и $r + dr$, равно $4\pi n r^2 dr$. Тогда общий световой поток на Землю от всех звезд равен

$$L = \int_0^{\infty} \left(\frac{l}{4\pi r^2} \right) 4\pi n r^2 dr = nl \int_0^{\infty} dr.$$

Интеграл расходится, следовательно, световой поток от звезд бесконечно большой и небо должно было бы сиять ослепительно ярким светом. Фактически такой расчет означает, что, в каком бы направлении ни смотреть, мы должны были бы увидеть поверхность какой-нибудь звезды; небо оказалось бы равномерно освещенным, как поверхность Солнца. Введение темных облаков межзвездной пыли не спасает положение: эта пыль очень быстро нагрелась бы и излучала, как и окружающие ее звезды. Таким образом, либо Вселенная должна была бы существовать только в конечном интервале времени и быть конечной в пространстве, либо звезды должны были бы блекнуть с расстояниями быстрее, чем это считается. Парадокс Ольберса не возникает в современной космологии, потому что время жизни звезд конечно. Это есть главный аргумент, второй — это расширение Вселенной (об этом можно прочесть, например, в монографии [22]).

Такая же трудность возникает при вычислении гравитационного потенциала пробного тела (Зеелигер, 1895 г.). Находясь в центре уже рассмотренного шарового слоя, тело будет иметь гравитационный потенциал $d\varphi = -Gdm/r$, где $dm = 4\pi n\mu r^2 dr$ — масса слоя, $n\mu$ — плотность массы в единице объема, G — постоянная тяготения ($G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$). Потенциал, создаваемый всем пространством, будет вновь определяться расходящимся интегралом

$$\varphi = \int d\varphi = 4\pi n\mu G \int_0^{\infty} r dr,$$

при этом действующая на это тело гравитационная сила $\mathbf{F} = \nabla\varphi$ будет неопределенной.

Еще одна проблема связана с применением законов термодинамики к такой стационарной и существующей бесконечно время Вселенной. Действительно, согласно закону роста энтропии все температуры в ней должны бы выровняться и звезды потухнуть.

Таким образом, доэйнштейновская космология столкнулась с большими затруднениями, которые приводили к заключению, что естественная для воззрений того времени стационарная однородная евклидова модель в чем-то неверна. Несмотря на это, большинство астрономов XIX в. подписались бы под простой космологической картиной, в которой Вселенная предполагается бесконечно вечной во времени и с евклидовой геометрией пространства, звезды в среднем покоятся и средняя светимость единицы объема постоянна.

3. ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОСМОЛОГИЯ

После создания Эйнштейном в 1915 г. ОТО им была предпринята попытка найти также стационарные решения своих уравнений в присутствии материи. Однако существование таковых оказалось возможным только после одного обобщения этих уравнений, именно путем введения дополнительного общековариантного члена $\Lambda g_{\mu\nu}$ (см. далее), названного лямбда-членом (Λ -член). Отметим еще, что вскоре за этой работой появилось найденное де Ситтером стационарное решение эйнштейновских уравнений ОТО без наличия материи, т. е. в пустом пространстве, но с Λ -членом.

В своей фундаментальной работе «Вопросы космологии и общая теория относительности», опубликованной в 1917 г. [23], А. Эйнштейн писал, что Вселенная состоит из звезд (тогда еще не было доказано существование галактик), тем не менее его рассуждения имели большое влияние на развитие космологии, поскольку им была предложена модель Вселенной, наделенная так называемым космологическим принципом. Такая Вселенная равномерно заполнена материей, в ней можно определить космологическое время таким образом, чтобы локальные свойства Вселенной, усредненные по достаточно большому объему, зависели только от этого времени. В частности, плотность и температура материи, кривизна пространства и метрика должны быть только функциями времени. При таких условиях очень сложные полевые уравнения общей теории относительности сильно упрощаются, их можно решать, находя одновременно эволюцию материи и геометрии. Фактически если иметь дело не с ранними моментами времени жизни Вселенной, то некоторые (но не все) уравнения этой теории следуют из ньютоновского приближения, но, прежде чем обсуждать эти уравнения, необходимо ввести на математическом языке геометрии пространств понятие «однородной» Вселенной, это будет проделано в следующем разделе.

4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ КОСМОЛОГИЯ ФРИДМАНА

Исторически к выводу о расширении Вселенной пришли двумя путями [3] — в результате нахождения теоретическим путем нестационарного решения космологических уравнений (А. А. Фридман, 1922, 1924 гг.) и путем анализа наблюдательных данных, полученных с помощью созданного в обсерватории Маунт-Вильсон большого телескопа (диаметр зеркала 2,5 м) при изучении красных смещений в спектрах галактик местной группы. В 1927–1929 гг. Э. Хаббл интерпретировал эти красные смещения как результат разбегания галактик (космологический эффект Доплера), установив приближительное линейное соотношение между скоростями разбегания и расстояниями до этих галактик. Такая интерпретация пережила десятилетия и действует поныне как закон Хаббла [15]. Отметим некоторые следствия, вытекающие из него.

Не вдаваясь пока в проблему определения расстояний в ОТО, обозначим расстояние от наблюдателя до галактики через r , а скорость разбегания через v , тогда закон Хаббла гласит:

$$v = Hr, \quad (1)$$

где H — постоянная Хаббла, которая, как выяснилось впоследствии, вовсе не постоянная, а является функцией космологического времени. Конечно, нам пришлось бы ждать миллионы лет, прежде чем обнаружилось бы какое-либо изменение H для любой галактики. Если смотреть на очень далекие галактики, то мы видим их в далеком прошлом (расстояние до самой удаленной наблюдаемой галактики $5 \cdot 10^9$ св. лет — столько лет идет от них к нам световой сигнал), следовательно, мы можем определить, каким тогда было значение H . Конечно, это существенно зависит от точности определения расстояний*. Еще недавно принималось значение

$$H_0 = (65 \pm 10) \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк}), \quad (2)$$

оно соответствует увеличению скорости разбегания на 65 км/с при увеличении расстояния на 1 Мпк (1 Мпк = 10^6 пк). Поскольку обратная величина H^{-1} имеет, как это следует из (1), размерность времени, то эта величина, называемая временем Хаббла,

$$H_0^{-1} \simeq (7,5 \pm 4,5) \cdot 10^9 \text{ лет}$$

*Более точное определение расстояний, а значит и H , ожидается из наблюдений с помощью космического телескопа «Хаббл» с диаметром главного зеркала 2,4 м. По сравнению с находящимся на Земле телескопом телескоп на орбите улучшает разрешение во столько же раз, во сколько телескоп Галилея чувствительнее глаза человека. Предварительно из этих наблюдений было получено $H_0 = (71 \pm 12) \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$.

дает нам предварительную оценку возраста Вселенной. Если бы H было действительно постоянно, то это означало бы, что все галактики находились в одной и той же точке в прошлом — H_0^{-1} лет назад, но галактики притягивают друг друга, поэтому величина H была в прошлом больше, поскольку больше была скорость разбегания галактик. Это означает, что величина H_0^{-1} представляет собой в действительности лишь приблизительный возраст Вселенной.

Интересно отметить, что закон Хаббла уже в рамках ньютоновской гравитации приводит к важному в космологии понятию критической плотности вещества во Вселенной. Следуя рассуждениям Милна и Маккри (1936 г.), рассмотрим сферу достаточно большого радиуса r , внутри которой содержится много галактик (среднее расстояние между галактиками порядка 1 Мпк $\sim 3,2 \cdot 10^6$ св. лет, поэтому будем считать $r \gg 1$ Мпк $\simeq 3,1 \cdot 10^{19}$ км, но меньше расстояния, характеризующего Вселенную в целом, $r \ll 10^{10}$ св. лет. Масса такой сферы равна ее объему на среднюю плотность ρ вещества в ней:

$$M = \frac{4\pi r^3}{3} \rho. \quad (3)$$

Из ньютоновской теории следует, что потенциальная энергия W галактики массы m , расположенной на поверхности такой сферы, равна

$$W = -\frac{GMm}{r} = -\frac{4\pi Gm}{3} r^2 \rho,$$

а скорость ее удаления от центра сферы пусть определяется законом Хаббла. Тогда ее кинетическая энергия равна

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mH^2 r^2}{2}.$$

Полную энергию этой галактики можно теперь записать в виде

$$E = W + \frac{mv^2}{2} = mr^2 \left[\frac{H^2}{2} - \frac{4\pi}{3} G\rho \right], \quad (4)$$

и она остается постоянной в процессе движения. Далее ясно, что если $E > 0$, то галактика уйдет от этой сферы на бесконечность, если же $E < 0$, то она не может бесконечно удаляться, поскольку вносящая отрицательный вклад потенциальная энергия W уменьшается с увеличением расстояния. Поэтому условие того, что галактика имеет минимальную скорость отрыва от этой сферы, есть $E = 0$. Из (4) получаем для критической плотности, т. е. плотности, при которой еще возможен этот отрыв, выражение

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3}{8\pi G} H^2. \quad (5)$$

При современном значении H_0 (см. (2)) она оказывается равной

$$\rho_{\text{кр}} = 1,35 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3, \quad (6)$$

или, учитывая, что в одном грамме вещества содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ ядерных частиц, получаем $\rho_{\text{кр}} \simeq 3$ нуклон/ м^3 . Для сравнения приведем среднюю плотность воздуха в земных условиях $\rho_{\text{атм}} = 3 \cdot 10^{25}$ молекула/ м^3 . Несмотря на кажущуюся малость $\rho_{\text{кр}}$, по современным оценкам, во Вселенной барионная плотность материи оказывается на два порядка меньше:

$$\Omega_{\text{бар}} = \frac{\rho_{\text{бар}}}{\rho_{\text{кр}}} \simeq 0,03 \pm 0,01. \quad (7)$$

Таким образом, уже в рамках ньютоновской космологии возникает проблема объяснения расширяющейся Вселенной (закон Хаббла), поскольку ее поведение (расширение, стационарное состояние или сжатие) зависит от величины Ω , как это следует из предыдущих расчетов в рамках ньютоновской механики.

Другая очень важная характеристика нестационарной Вселенной — величина замедления скорости расширения — также качественно может быть оценена в ньютоновской космологии. Действительно, из закона Ньютона с учетом (3) имеем

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2} = -\frac{4\pi G}{3}\rho r, \quad (8)$$

откуда, как и следовало ожидать, видно, что замедление (знак у ускорения отрицательный) увеличивается с возрастанием плотности материи во Вселенной.

Перейдем к рассмотрению космологической модели расширяющейся Вселенной — модели Фридмана, которая утвердилась в космологии после открытия красного смещения и реликтового электромагнитного фона (см. разд. 7).

Теоретической основой этой модели является ОТО, в которой, как уже отмечалось, А. А. Фридман нашел нестационарные решения, определяющие эволюцию Вселенной. В результате успешного развития эта модель была названа стандартной космологической моделью строения и эволюции Вселенной. Начальное состояние в модели постулируется — Вселенная возникла и расширяется из некоторого сверхсжатого и сверхгорячего состояния, произошедшего 10–15 млрд лет назад в результате так называемого Большого взрыва. Однако природа такого состояния неизвестна. Эта начальная точка возникновения Вселенной, в которой такие физические величины, как температура, давление, плотность энергии и т. д., достигали огромных, а может быть, и бесконечно больших значений, является сингулярной точкой, где физические процессы не описываются уравнениями физики, и из рассмотрения в этой модели исключается. Поэтому теоретические расчеты начинаются с некоторого

момента времени после взрыва (момента неопределенности). Таким моментом выбирается время Планка $t_{\text{Планк}}$, «сконструированное» из постоянной Планка \hbar , скорости света c , гравитационной постоянной Ньютона G и равное

$$t_{\text{Планк}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с.}$$

С определенным основанием считается, что в этот момент температура «огненного шара» достигала величины $T \sim 10^{32}$ К, а все известные взаимодействия — гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое — еще были слиты в единую силу и ни одна из элементарных частиц еще не материализовалась (если предположить их существование, то тогда при таких температурах они имели бы фантастические энергии, по порядку величины равные $E = kT = 10^{28}$ эВ).

Чуть позже этого времени, когда с момента Большого взрыва прошло примерно 10^{-36} с и тепловая энергия снизилась до значения порядка 10^{24} эВ, симметрия силы нарушилась, выделилась гравитационная сила и первые из частиц приобрели массы, но они сразу же распались на кварки и лептоны. Таковы были в самых общих чертах представления о первых моментах жизни Вселенной в этой модели.

Во времена создания теории горячей Вселенной, возникшей, как мы видели, из сингулярной точки, таких рассмотрений исходного момента зарождения Вселенной не предпринималось, создатели этой теории базировались на имевшемся тогда наблюдательном материале в космологии и прежде всего на установившемся тогда мнении, что наблюдаемая Вселенная является однородной и изотропной. Однородность здесь означает, что во Вселенной не должно быть привилегированного положения, не должно быть центра, из которого она выглядела бы иначе, чем из любого другого места, а изотропность, в частности, ведет к тому, что из положения, в котором мы находимся, Вселенная должна выглядеть во всех направлениях одинаково. Оказывается, что эти условия накладывают сильные ограничения на возможные движения масс во Вселенной [24].

Действительно, представим себе, что галактики (для наших целей их можно на больших расстояниях рассматривать как частицы во Вселенной) соединены стержнями, тогда они и соединяющие их стержни образовали бы решетку наподобие кристаллической. Однородность и изотропность требуют, чтобы с течением времени форма такой решетки оставалась одной и той же, единственное, что может меняться, — это длина воображаемых связующих стержней. Другими словами, может меняться масштаб решетки, но не ее форма. Следовательно, можно определить состояние такой системы в любой данный момент времени, просто задавая текущее значение масштаба решетки, который в дальнейшем будем обозначать через $a(t)$, где t — космическое время.

Поясним подробнее с обращением к формулам римановой геометрии, почему и как Вселенная рассматривается на поздних этапах своего развития однородной и изотропной и какие при этом расстояния принимаются во внимание. Современные телескопы дают возможность заглянуть в просторы Вселенной на расстояния порядка миллиардов световых лет (современные видимые размеры Вселенной 10^{10} св. лет $\simeq 10^{23}$ км). Если теперь взять куб с линейными размерами порядка 10^8 св. лет, то в нем будет находиться, как уже отмечалось, множество галактик (размер нашей Галактики порядка 10^5 св. лет). Рассматривают кубы такого размера в разных доступных нам частях Вселенной (сейчас в ней существуют около 10^{10} наблюдаемых галактик) и убеждаются, что галактики в этих масштабах распределены почти однородно.

Привлекая сюда космологический принцип, согласно которому Солнечная система, а также наша Галактика не занимают какое-то выделенное положение в космосе и не являются какими-то центрами симметрии (антиантропоцентризм), приходим к заключению, что Вселенная к тому же еще изотропна. Итак, рассматривая Вселенную в больших масштабах как однородную и изотропную, можем на математическом языке сформулировать эти свойства заданием простейшей однородной и изотропной метрики ее риманова пространства, называемой метрикой Фридмана–Леметра–Робертсона–Уокера [5, 7]:

$$g_{\mu,\nu}dx^\mu dx^\nu = ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]. \quad (9)$$

Здесь r, θ, φ — сферические координаты точки на пространственно-временной гиперповерхности с центром в любой точке, поскольку пространство однородно, например, на Земле; $a(t)$ — неизвестная функция времени (о ней будет сказано ниже), ответственная за временную эволюцию, и k — постоянная, которая при подходящем выборе единиц для r принимает значения $+1, 0, -1$. Она вместе с $a(t)$ определяет трехмерную скалярную кривизну пространственной части четырехмерного риманова пространства, так как геометрические свойства трехмерного пространства при постоянном t определяются его метрическим тензором g_{ij} , который, как видно из (9), имеет компоненты

$$g_{rr} = \frac{a^2(t)}{1 - kr^2}, \quad g_{\theta\theta} = a^2(t)r^2, \quad g_{\varphi\varphi} = a^2(t)r^2 \sin^2 \theta, \quad g_{ij} = 0, \quad i \neq j. \quad (9a)$$

В геометрии Римана скалярная кривизна такого пространства равна $k(t) = ka^{-2}(t)$. Отсюда следует, что при $k = 0$ оно плоское и бесконечное, при $k = +1$ получаем поверхность трехмерной сферы радиуса $a(t)$ в четырехмерном пространстве — в этом случае есть все основания называть $a(t)$ космическим масштабным фактором, и, наконец, для $k = -1$ получаем открытую гиперболическую Вселенную (трехмерная псевдосфера, двумерный аналог которой есть седло).

В этом случае $a(t)$ по-прежнему характеризует геометрические размеры пространства, поскольку собственное расстояние между точками 0, r_1 для геометрии с метрикой (9а) задается во всех трех случаях выражением

$$l(t) = \int_0^{r_1} \sqrt{g_{rr}} dr = a(t) \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}} \quad (10)$$

и растёт или уменьшается вместе с $a(t)$, поэтому $a(t)$ для всех значений k называется космическим масштабным фактором. Время t в выражении (9) является собственным временем каждого свободно падающего тела во Вселенной, для которого $dx = 0$, и, следовательно, интервалом для него является, согласно (9), величина $ds^2 = c^2 dt^2$. Поскольку все галактики во Вселенной считаются находящимися в свободном падении, то t есть эталонное космическое время в свободно падающей вместе с телами системе отсчета (координатная система Леметра [5]).

Рассмотрим, как в таком пространстве математически формулируется закон Хаббла. Для этого предположим, что световой источник (галактика) находится в точке r_1 и в момент времени t_1 от него начала распространяться в направлении приемника (Земля), находящегося в точке $r = 0$, световая волна, которая принимается на Земле в момент времени t_0 . Для простоты формул будем считать, что вдоль луча света в этом направлении $d\theta = d\varphi = 0$, тогда в пространстве с метрикой (9) имеем для света, распространяющегося по геодезической:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \frac{dr^2}{1 - kr^2} = 0, \quad (11)$$

откуда следует равенство

$$\frac{cdt}{a(t)} = \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}. \quad (12)$$

Время t_0 при достижении волны приемника будет определяться интегрированием этого уравнения:

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}. \quad (13)$$

Следующий гребень волны покидает точку r_1 в момент $t_1 + \delta t_1$, где δt_1 — период, связанный с длиной волны λ_1 испускаемого света $\delta t_1 = \lambda_1/c$, и «приходит» к наблюдателю в момент $t_0 + \delta t_0$, где $\delta t_0 = \lambda_0/c$, λ_0 — длина волны пришедшего света. Снова интегрируем равенство (12):

$$\int_{t_1 + \delta t_1}^{t_0 + \delta t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}}. \quad (14)$$

Принимая во внимание, что периоды δt_1 и δt_0 для типичного видимого света малы и составляют по порядку величины 10^{-14} с, можем разложить левую часть (14) по этим величинам, ограничиваясь линейными по δt_1 и δt_0 членами. Далее, поскольку правые части уравнений (13) и (14) совпадают, имеем равенство

$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_{t_1+\delta t_1}^{t_0+\delta t_0} \frac{cdt}{a(t)} \simeq \int_{t_1}^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} + \frac{c\delta t_0}{a(t_0)} - \frac{c\delta t_1}{a(t_1)},$$

откуда получаем, что

$$\frac{\delta t_0}{a(t_0)} = \frac{\delta t_1}{a(t_1)}, \quad \text{или} \quad \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)}. \quad (15)$$

Таким образом, если Вселенная расширяется $a(t_0) > a(t_1)$, тогда $\lambda_0 > \lambda_1$ и красное смещение в атомных спектрах связано с ее «размерами» в момент испускания и в момент поглощения света. Однако здесь необходимо заметить, что это утверждение справедливо, если только предполагается, что на наблюдаемых галактиках атомы излучают так же, как и в земных условиях, но есть и другие космологические модели [6, 24, 25], в которых массы, в том числе атомов, со временем растут, тогда в прошлом испускающий свет атом будет легче, а его длина волны больше, чем у потяжелевшего за время распространения света атома на Земле, т. е. опять будем иметь красное смещение.

Введем теперь принятую в космологии величину z , характеризующую красное смещение:

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1}, \quad (16)$$

тогда, учитывая, что сравнительно близкие к нам галактики движутся относительно Млечного Пути с нерелятивистскими радиальными скоростями $v < 10^4$ км/с, можем воспользоваться нерелятивистской формулой [7], связывающей величину z со скоростью источника:

$$z = \frac{v}{c}. \quad (17)$$

Из сопоставления (15), (16) и (17) при относительно малых z и малом времени распространения света от источника до Земли можем, ограничиваясь первым порядком разложения в ряд Тейлора по величине $(t_0 - t)$, записать

$$z = \frac{v}{c} = \frac{a(t_0) - a(t_1)}{a(t_1)} \Rightarrow \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)}(t_0 - t_1) + \dots, \quad (18)$$

а умножая это равенство на скорость света и используя закон Хаббла, в этом приближении получаем

$$zc = v \simeq \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} c(t_0 - t_1) = H_0 r.$$

Поскольку $r = c(t_0 - t_1)$, то из этого равенства следует, что логарифмическая производная по времени от масштабного фактора определяет «постоянную» Хаббла:

$$H_0 = \frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)}. \quad (19)$$

Можно еще учесть вклад следующего члена в разложении (18), для этого введем величину

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}(t_0)a(t_0)}{\dot{a}(t_0)^2}, \quad (20)$$

называемую в космологии параметром замедления, тогда имеем

$$z = \frac{v}{c} = H_0(t_0 - t_1) + \left(1 + \frac{q_0}{2}\right) H_0(t_0 - t_1)^2 + \dots \quad (21)$$

Данное выражение уточняет формулу для времени распространения света в зависимости от величины красного смещения z и констант H_0, q_0 . Действительно, если из (18) мы получаем

$$t_0 - t_1 = \frac{z}{H_0}, \quad (22)$$

то из (21) для этой величины следует еще и зависимость от замедления:

$$t_0 - t_1 = \frac{1}{H_0} \left[z - \left(1 + \frac{q_0}{2}\right) z^2 + \dots \right]. \quad (23)$$

Замедление играет в космологии важную роль, что следует, например, уже из рассмотрения ньютоновского уравнения (8), которое теперь, с учетом определения расстояния в принятой метрике (10), переписывается как уравнение на масштабный фактор

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4\pi G}{3} \rho a(t) \quad (24)$$

(не зависящий от времени множитель в (10) в обеих частях уравнения (24) сокращается). Умножая (24) на неравную нулю величину $2a(t)/\dot{a}(t)^2$ и принимая во внимание (19) и (20), а также определение критической плотности (5), получаем равенство

$$2q = \frac{8\pi G}{3H^2} \rho = \frac{\rho}{\rho_{\text{кр}}}, \quad (25)$$

устанавливающее простую и физически наглядную связь между параметром замедления и плотностью вещества во Вселенной. Такая же связь между этими величинами вытекает и из уравнений ОТО [5].

Таким образом, как следует из приведенных соотношений, динамика Вселенной полностью определяется масштабным фактором $a(t)$, а его зависимость от времени определяется уравнениями ОТО, которые рассматриваются ниже.

5. УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА–ФРИДМАНА

В общей форме уравнения ОТО записываются* в виде тензорного равенства [5, 7]

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (26)$$

где $R_{\mu\nu}$ — тензор Риччи, вычисляемый по метрическому тензору $g_{\mu\nu}$, который у нас задан симметрической изотропной метрикой Фридмана–Робертсона–Уокера (9), а его компонентами являются

$$g_{00} = g_{tt} = 1, \quad g_{i0} = g_{it} = 0, \quad g_{ij}(x) = a^2(t)\tilde{g}_{ij},$$

где i, j «пробегают» три пространственные координаты r, θ, φ , а $\tilde{g}_{ij}(x)$ — метрика трехмерного максимально симметричного пространства (ср. (9а)):

$$\tilde{g}_{rr} = (1 - kr^2)^{-1}, \quad \tilde{g}_{\theta\theta} = r^2, \quad \tilde{g}_{\varphi\varphi} = r^2 \sin^2 \theta, \quad \tilde{g}_{ij} = 0, \quad i \neq j. \quad (27)$$

Величина R есть свернутый тензор Риччи $R = R^\mu_\mu$, а $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса (вид которого при описании динамики изотропной и однородной Вселенной выбирается, как в модели идеальной жидкости с плотностью $\rho(t)$ и давлением $p(t)$), имеющий диагональный вид в выбранной системе координат:

$$T_{\mu\nu} = \text{diag}(\rho, -p, -p, -p). \quad (28)$$

Из уравнения (26) для временной компоненты ($\mu = \nu = 0$) следует уравнение

$$\frac{\dot{a}^2(t)}{a^2(t)} + \frac{k}{a^2(t)} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t), \quad (29)$$

а диагональные пространственные компоненты ($\mu = \nu = 1, 2, 3$) дают еще одно уравнение

$$2\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} + \frac{\dot{a}^2(t)}{a^2(t)} + \frac{k}{a^2(t)} = -8\pi Gp(t). \quad (30)$$

*Здесь и далее полагается $c = 1$.

Недиагональные компоненты ($\mu \neq \nu$) уравнения (26) тождественно равны нулю.

Уравнения (29) и (30) должны быть дополнены (так как содержат три неизвестные функции $a(t)$, $\rho(t)$, $p(t)$) еще уравнением состояния вещества, связывающим плотность вещества $\rho(t)$ и давление $p(t)$. Однако еще до того, как конкретизировать его, можно из (29) и (30) получить ряд важных и интересных следствий, первое из которых состоит в следующем: поскольку параметр k , определяющий геометрию пространства, входит в оба эти уравнения одинаковым образом (в комбинации $k/a^2(t)$), то при вычитании одного уравнения из другого получаем

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)a(t), \quad (31)$$

совпадающее при $p = 0$ с ньютоновским уравнением (24).

Отсюда мы можем заключить, что космологические уравнения ОТО, учитывающие эффект давления в гравитирующем веществе, например давление радиации, находящейся в объеме вещества, и определяющие геометрию пространства (в (29), (30) присутствует параметр кривизны пространства k), при $p = 0$ и $k = 0$ эквивалентны ньютоновскому уравнению (24). Продемонстрируем эту эквивалентность на примере уравнения (29). Переписываем его в форме

$$\dot{a}^2(t) + k = \frac{8\pi G}{3}\rho a^2(t), \quad (32)$$

будем считать плотность ρ постоянной величиной, тогда это уравнение может быть получено из ньютоновского уравнения (24) путем интегрирования по времени с интегрирующим множителем $\dot{a}(t)$. При этом постоянная k возникнет как неопределенная константа интегрирования, истолковать которую как параметр кривизны пространства в рамках ньютонового абсолютного и евклидова пространства, конечно, невозможно (для него всегда $k = 0$). Далее, из уравнения (31) в предположении, что $\rho(t)$ и $p(t)$ всегда положительны (что касается давления $p(t)$, то это предположение не всегда оправдывается, см. разд. 10), опять следует $\ddot{a}(t) < 0$, т. е. расширение происходит с замедлением.

Второе следствие получается из этих уравнений, если переписать (29) в терминах «константы» Хаббла (19) и критической плотности (5):

$$\frac{\dot{a}^2(t)}{a^2(t)} = H^2(t), \quad \rho_{\text{кр}} = \frac{3H^2(t)}{8\pi G},$$

в этом случае

$$\rho(t) - \rho_{\text{кр}} = \frac{3}{8\pi G} \frac{k}{a^2(t)}. \quad (33)$$

Это равенство связывает знак кривизны пространства k со знаком разности $\rho(t) - \rho_{кр}$, из которого, в частности, следует, что при $\rho(t) = \rho_{кр}$ мы имеем плоскую евклидову Вселенную $k = 0$. По современным данным, $\rho < \rho_{кр}$, следовательно, $k < 0$.

Разделив (33) на $\rho_{кр}$ и учитывая уравнение (25) для замедления, получаем уравнение, связывающее замедление и параметр кривизны:

$$2q - 1 = \frac{k}{H^2(t)a^2(t)}, \quad (34)$$

из которого, так же как и из (25), следует, что при $q = 1/2$ пространство плоское. Это утверждение можно проиллюстрировать рис. 1 [5], кривые которого приведены для трех значений разности $\rho - \rho_{кр} \gtrless 0$.

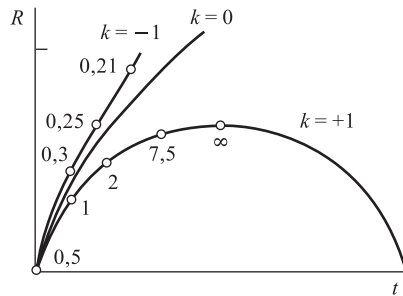


Рис. 1. Решения уравнений Эйнштейна для Вселенной Робертсона–Уокера с кривизной $k = +1; 0; -1$. Числа вдоль кривых $k = \pm 1$ дают значения параметра замедления q в различные эпохи. Здесь по оси абсцисс отложено время t , а по оси ординат — космический масштабный фактор $R = a(t)$

Таким образом, не решая исходной системы уравнений (29), (30), а только используя их следствия, приходим к заключению, что экспериментально определяемые в настоящий момент времени величины ρ_0, q_0, H_0 не должны противоречить уравнениям (33) и (34), их связывающим, если, конечно, мы верим в справедливость исходных предположений, использованных при построении такой теории расширяющейся Вселенной.

6. ПРОБЛЕМА, СВЯЗАННАЯ С ВЕЛИЧИНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Пусть теперь дано еще уравнение состояния вещества во Вселенной $p = p(\rho)$, тогда система уравнений (29), (30), дополненная этим уравнением, становится замкнутой и позволяет, в принципе, определить три функции $\rho(t)$, $p(t)$ и $a(t)$. Однако вывести такое уравнение состояния для всех фаз развития Вселенной не удастся, и поэтому прибегают к следующим рассуждениям [5].

В отсутствие гравитации тензор энергии-импульса идеальной жидкости* задается в ковариантном виде следующим образом:

$$T^{\mu\nu} = (\rho + p)u^\mu u^\nu + pg^{\mu\nu},$$

где u_μ — вектор 4-скорости, которая в выбранной нами системе отсчета (сопутствующая система) имеет компоненты $u_0 = 1, u_i = 0$, т. е. содержимое Вселенной в среднем покоится в этой системе, тогда имеем выражение (28). Тензор $T^{\mu\nu}$ подчиняется уравнению непрерывности $T^\mu{}_\nu{}^\mu{}_\nu = 0$, из которого следуют гидродинамические уравнения для вещества во Вселенной. В нашем однородном и изотропном случае эти уравнения тривиально удовлетворяются для пространственных компонент при $\mu = r, \theta, \varphi$, а временная компонента $\mu = 0$ приводит к уравнению

$$\frac{d}{dt}(\rho a^3) = -3pa^2\dot{a}, \quad (35)$$

которое в теории сплошных сред [7] трактуется как уравнение сохранения энергии. Если теперь считать, что основной вклад в плотность Вселенной дает нерелятивистское вещество (вещественно-доминантная фаза) с пренебрежимо малым давлением $p \ll \rho$, то из (35) следует

$$\rho \sim a^{-3} \text{ при } p \ll \rho, \quad (36)$$

если же преобладает вклад релятивистских частиц, таких, например, как фотоны, для которых справедливо уравнение состояния $p = \rho/3$ (фаза доминирования радиации), то из (35) получаем

$$\rho \sim a^{-4} \text{ при } p = \rho/3. \quad (37)$$

Для каждой из этих зависимостей ρ от a можно решить уравнения (29), (30) и определить функцию $a(t)$ для всех тех моментов времени, для которых эти зависимости справедливы.

Еще раз отметим, что основанные на таком подходе и метрике Фридмана–Леметра–Робертсона–Уокера космологические модели, в которых $a(t)$ определяется из указанных уравнений, называются моделями Фридмана [5].

Перейдем к обсуждению некоторых известных с хорошей достоверностью астрофизических данных по плотности видимой материи во Вселенной.

Во-первых, если принять значения $q_0 \approx 1$ и $H_0 \approx 75$ км/(с · Мпк), полученные из соотношения между красным смещением и светимостью, то с

*В [5] доказывается, что тензор энергии-импульса Вселенной с необходимостью принимает вид тензора идеальной жидкости.

необходимостью получаем, что плотность должна быть около $2\rho_{\text{кр}}$, т. е. порядка $3 \cdot 10^{-29}$ г/см³. Однако это значение явно не согласуется с наблюдаемой плотностью масс галактик. Массы спиральных галактик в пределах 15 Мпк могут быть определены, в частности, из динамического анализа зависимости их внутренних окружных скоростей от расстояния до центра галактики; эти скорости измеряются по распределению красного смещения относительно среднего значения z для данной галактики. Не вдаваясь в подробности этого метода, приведем современное значение относительной плотности галактик во Вселенной:

$$\Omega_{\text{гал}} = \frac{\rho_{\text{гал}}}{\rho_{\text{кр}}} \approx 0,028. \quad (38)$$

Следовательно, если бы масса Вселенной была сконцентрирована в галактиках, то из (25) получился бы параметр замедления, равный $q_0 = 0,014$, а из (33) следовало бы, что $k = -1$, и Вселенная была бы открытая. Это значение явно не согласуется с результатом определения q_0 по красным смещениям и светимости.

В связи с этим разногласием и рядом других проблем (например, с обоснованием популярной в настоящее время инфляционной космологической модели, в которой плотность должна быть с точностью $\delta\rho/\rho \sim 10^{-3}$ равна критической) возникает вопрос о скрытой массе во Вселенной, несомненно, важной не только в свете рассмотренного противоречия, но и для всей современной физической картины мира.

Приведем ряд фактов, косвенно указывающих на существование такой скрытой (невидимой) материи, которая проявляет себя только гравитационным воздействием на видимые объекты, но ни оптически, ни радиоизлучением не обнаруживается.

Впервые, благодаря создаваемому темной материей тяготению, она была «заподозрена» еще в 1933 г. Ф. Цвикки, который изучал кинематику и динамику скопления галактик в созвездии Волосы Вероники и установил, что галактики в этом скоплении движутся с такими скоростями (тысячи километров в секунду), при которых гравитационно удержать их в наблюдаемом объеме скопления можно лишь при условии, что полная масса такого скопления раз в десять больше суммарной массы составляющих его галактик.

Другим свидетельством наличия скрытого вещества является распределение скоростей вращения рукавов (спиралей) галактик, т. е. зависимость таких скоростей v от галактоцентрической координаты r , что позволяет измерить зависимость плотности вещества в галактике от r . Действительно, из ньютоновского закона движения массы m в поле тяготения большой массы M

$$\frac{GmM}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

имеем

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (39)$$

(масса M находится внутри орбиты вращения тела массой m). Функция $v(r)$ будет определяться зависимостью массы M шара радиуса r от этого радиуса и в случае однородной плотности будем иметь $M = (4\pi/3)r^3\rho$. В нашей и во многих других спиральных галактиках $v(r)$ после некоторого начального роста с расстоянием от центра r остается приблизительно постоянной при увеличении r , откуда следует, что масса шара растет приблизительно как r , а это быстрее, чем рост массы наблюдаемых звезд с расстоянием от центра. Несмотря на предположение о наличии в исследуемых галактиках большого количества пыли, что влияет на прозрачность и в связи с чем наблюдается значительно меньше звезд, чем их есть в галактиках, тем не менее приходят к выводу, что существуют невидимые гало вокруг галактик с радиусами не менее 30 кпк.

То же подтверждается наблюдением за движением спутниковых галактик, например за скоростью вращения Магеллановых Облаков вокруг Млечного Пути. Галактики полярного кольца, имеющие кольцо из звезд в плоскости, перпендикулярной поверхности их диска, тоже имеют для таких звезд закон $v(r) \sim \text{const}$ при больших расстояниях от центра, что указывает на сферическое распределение невидимой темной материи вне диска галактик.

Изучение рентгеновского излучения эллиптических галактик приводит к заключению, что газ во внешних областях этих галактик имеет температуру порядка 10^7 – 10^8 К, а такой температуре соответствуют скорости газовых частиц, превышающие скорость покидания, если, конечно, эта скорость вычисляется для видимой материи, которой не хватает для удержания этих верхних газовых слоев.

Наконец, на существование невидимой материи указывают и исследования эффекта гравитационного линзирования [9], когда наблюдается двойное изображение источника (например, квазара), а линзой является галактика. Исходя из подобных наблюдений плотность скрытого вещества в дисках галактик, гало и скоплениях галактик в сумме не превосходит величины $\Omega_T \sim 0,3$.

Следующим важнейшим вопросом является природа скрытого вещества, т. е. барионная (протоны и нейтроны) или небарионная (нейтрино с ненулевой массой, нейтралы, гравитоны и т. д.). Рассматривается также возможность того, что существенный вклад в скрытое вещество вносят черные дыры, образованные в результате коллапса барионного вещества. Также не обнаруженные, но предполагаемые объекты могут давать вклад в барионную составляющую (так называемые «снежные шары» — образования из конденсированного водорода, нижний предел их массы оценивается в 10^{26} г (для

сравнения масса Солнца $2 \cdot 10^{33}$ г). Есть, однако, и аргументы против того, что таких «снежных шаров» могло бы быть достаточно много и они вносили бы существенный вклад в скрытое вещество: если бы их было много и они были бы образованы из водорода, то распространенность гелия должна была бы достигать недопустимо больших значений (имеется ограничение на распространенность гелия в космическом веществе, сформировавшем Солнце, — 0,3 от водорода).

Барионную скрытую массу могут составлять коричневые карлики, состоящие из H и He, масса которых слишком мала, чтобы в них происходили термоядерные реакции (минимальное значение массы звезды, в которой происходит горение водорода, должно быть не меньше 0,08 массы Солнца, а объекты из водорода с массами порядка 10^{-3} массы Солнца называются «юпитерами»). Таких объектов наряду с тусклыми красными звездами (M-карлики) с помощью космического телескопа Хаббла обнаружено мало, и вклад коричневых карликов в массу Галактики, по оценкам, составляет $< 6\%$, а M-карликов в диске Галактики не более чем 15% массы диска.

Нейтронные звезды, согласно теоретическим оценкам, по-видимому, должны давать не более 1% скрытого вещества в гало. Холодные облака молекулярного водорода, которые могли бы быть существенным компонентом темной материи, не обнаружены.

Итак, по оценкам, скрытая масса составляет всего $\Omega_T = 0,3 \pm 0,1$.

7. КОСМИЧЕСКИЙ ФОН МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Важнейшим космологическим открытием XX в. после закона Хаббла было обнаружение в 1969 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном космического реликтового электромагнитного излучения. Оно представляет собой микроволновое излучение с длинами волны от нескольких миллиметров до 73 см с планковским спектром абсолютно черного тела при температуре 2,7 К. Отклонение от изотропности этого излучения составляет не более чем 10^{-5} (с учетом поправок, связанных с движением наблюдателя на Земле, т. е. вращением Земли вокруг Солнца, вращением Солнца вокруг центра Галактики и движением самой Галактики).

Происхождение такого электромагнитного реликта в рамках модели расширяющейся Вселенной объясняется тем, что в первые моменты после Большого взрыва вещество и излучение были в тепловом равновесии при очень высокой температуре и при последующем расширении Вселенной излучение и вещество остывали. Спустя примерно 100 с после взрыва, при температуре диссоциации дейтерия 10^9 К, свободные протоны и нейтроны начали сливаться в ядра более тяжелых элементов, например, $n + p \rightarrow d + \gamma$ и далее путем последовательного захвата нейтронов вплоть до ${}^4\text{He}$ (не существует ста-

бильных ядер с атомным весом $A = 5$ или $A = 8$). С тех пор гелий составляет около четверти видимой массы Вселенной. Этот процесс называется в космологии первичным нуклеосинтезом, приводящим к оценке относительной распространенности в космосе легчайших ядер, которая с достаточно высокой точностью наблюдается сегодня и служит хорошей проверкой модели Большого взрыва.

Далее, когда температура упала до 10 000 К, что произошло по прошествии порядка 10^6 лет, а Вселенная достигла размеров десятков миллионов световых лет, свободные электроны оказались связанными в атомных оболочках ядер H, ^4He (процесс рекомбинации). Материя стала прозрачной для излучения, при этом тепловой контакт между веществом и излучением нарушился (томсоновское рассеяние фотонов на нейтральных атомах мало). С этого момента во Вселенной начали циркулировать свободные фотоны (как предсказал еще Г.Гамов в 1948 г. [11]), и от радиационно-доминантной фазы расширения с уравнением состояния (37) Вселенная перешла в вещественно-доминантную нерелятивистскую фазу с уравнением состояния (36).

Из таких временных оценок и возраста Вселенной (10^{10} лет) можно сделать вывод, что любой фотон, принятый нашими телескопами от самых далеких галактик или квазаров, доступных современным наблюдениям, имеет по красному смещению возраст во много раз меньше, чем время, отделяющее нас от радиационной стадии (равное возрасту Вселенной минус 10^6 лет). Поэтому наши наблюдения дают сведения лишь об эре преобладания вещества, и единственным отголоском раннего радиационно-доминантного состояния Вселенной является реликтовый микроволновый фон, который с той поры претерпел значительное охлаждение (до 2,7 К, а его красное смещение оценивается величиной $z \sim 1500$), но он по-прежнему заполняет все космическое пространство вокруг нас, являя собой бледный образ обсуждавшегося в разд. 2 парадокса Ольберса.

Вернемся к оценкам плотности энергии, вносимой как реликтовым фоном, так и другими ультрарелятивистскими компонентами вещества во Вселенной. Электромагнитный фон является равновесным излучением абсолютно черного тела, поэтому его плотность энергии определяется согласно закону Стефана–Больцмана: $\rho_{\text{ф}} = 4,4 \cdot 10^{-34}$ г/см³, что опять оказывается исчезающе-малой величиной по сравнению с критической плотностью $\rho_{\text{кр}} \sim 1,3 \cdot 10^{-29}$ г/см³. Плотность энергии света звезд для оптических частот (опять вспомним парадокс Ольберса) оценивается величиной не более чем 10^{-35} г/см³, а плотность потока наблюдаемого рентгеновского фона между 0,1 кэВ и 1 МэВ составляет порядка 10^{-37} г/см³. Плотность энергии γ -излучения выше 100 МэВ не превосходит величины 10^{-38} г/см³. Наблюдаемая плотность энергии частиц космических лучей составляет порядка 10^{-35} г/см³.

Эти оценки показывают, что из релятивистских частиц наибольший вклад в полную космическую плотность энергии вносит микроволновый фон, но его плотность, как мы видели, составляет не более одной сотой плотности масс покоя галактик.

Итак, до сих пор остается неизвестной физическая природа темного вещества, для которого обсуждается широкий диапазон возможностей: от элементарных частиц с массой меньше массы электрона, например нейтрино, до звезд-карликов и черных дыр с массой больше массы Солнца, т. е. массы кандидатов на эту роль различаются на добрых 60 порядков величины — такова численная мера имеющейся в настоящее время неопределенности в этой проблеме [10].

8. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Уже отмечалось, что в модели горячей Вселенной формирование химических элементов началось с этапа первичного нуклеосинтеза — образования из свободных нуклонов легчайших элементов: атомов водорода H, дейтерия D, гелия ^4He , ^3He и лития ^7Li на ранней стадии развития Вселенной (10^2 – 10^4 с, температура 10^8 – 10^9 К). Считается, что остальные тяжелые элементы возникли в звездах, и сценарий их возникновения качественно может быть описан следующим образом.

Когда температура снизилась до $3 \cdot 10^3$ К, гравитационное притяжение между молекулами начало превосходить их взаимное отталкивание за счет теплового движения. Гравитация, действуя на случайные флуктуации плотности в пространственном распределении молекул (в основном водорода и гелия), стала стягивать материю, формируя первоначальные крупномасштабные структуры — протогалактики, на основе которых позднее (через сотни миллионов лет после взрыва при температуре в сотни кельвин) стали образовываться звезды и звездные скопления — галактики. Изначальные флуктуации плотности сейчас проявляются в виде очень небольшой анизотропии в наблюдаемом угловом распределении космического микроволнового излучения.

Первые звезды состояли практически только из водорода и гелия в виде горячей плазмы с температурой в центральной части, достаточной для протекания термоядерных реакций, в результате образовывались более тяжелые элементы — вплоть до железа.

Слияние ядер во время горения тяжелых звезд — это второй важный процесс образования элементов, в результате которого формируются элементы Периодической системы вплоть до железа. Поскольку среди всех элементов железо обладает наибольшей энергией связи в расчете на один нуклон (около 8 МэВ/нуклон), образование более тяжелых элементов в результате

слияния ядер становится уже невозможным. Так как в охлаждающейся Вселенной вследствие кулоновских барьеров более тяжелые элементы не могут уже образовываться в достаточном количестве в процессах с участием заряженных частиц, основу третьего механизма составляют реакции захвата нейтронов с последующим β -распадом. Процесс β -распада создает предпосылки для увеличения на единицу атомного номера ядра. Согласно современной точке зрения формирование самых тяжелых элементов, тяжелее железа, происходит во внешних оболочках массивных звезд на стадии взрыва сверхновых.

Чем больше масса звезды, тем меньше она живет. По мере выгорания термоядерного топлива в достаточно массивной звезде (более десяти солнечных масс) силы гравитационного притяжения приводят к схлопыванию звезды — гравитационному коллапсу, когда внешняя часть звезды с огромной скоростью начинает сжиматься. В результате такого взрыва образуется ударная волна и выделяется колоссальная энергия, большую часть которой уносят нейтрино. В космическое пространство, как дым после взрыва бомбы, разлетается газообразное облако остатков прежней звезды, выбрасывая в космос новые химические элементы. Именно отсюда более поздние звездные образования, включая наше Солнце и планеты Солнечной системы, получают полный набор элементов.

Имеется также вспомогательный механизм формирования легких элементов типа Li, Be и B (а также, возможно, C, N, P, S и Cl), обусловленный так называемыми реакциями отщепления, или скалывания, когда легкая частица высокой энергии сталкивается с тяжелым ядром и выбивает легкий стабильный осколок. Предполагается, что реакции скалывания вызываются протонами, ускоренными в переменных электромагнитных полях во внешних слоях звезд. К примеру, протон с энергией выше 20 МэВ способен вызвать реакцию скалывания на всех без исключения тяжелых элементах, однако наибольшее значение имеют реакции с участием самых распространенных ядер (C, N, O, Fe). В частности, высокое содержание Li и преобладание изотопов Li и B в веществе Земли и метеоритов может быть объяснено такими реакциями, происходившими в процессе образования Солнечной системы.

Возможность правильного предсказания относительных распространенностей элементов, отличающихся друг от друга более чем на десять порядков, рассматривается как один из крупных успехов стандартной модели Большого взрыва.

В то время как космическое 2,7-К излучение дает информацию о состоянии Вселенной через 10^6 лет после Большого взрыва, распространенность легчайших ядер D, He и Li может быть использована для получения информации о Вселенной на значительно более раннем этапе ее развития.

9. ЕЩЕ О ПРОБЛЕМАХ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ

Наряду с уже отмеченной загадкой существования темной материи во Вселенной существует ряд других неразрешимых пока в рамках этой модели проблем, и среди них так называемая проблема горизонта. Суть ее сводится к вопросу: каким образом различные части Вселенной взаимодействовали между собой в начальной стадии расширения. Известно, что никакой физический процесс не может распространяться быстрее светового сигнала, поэтому в каждый момент времени от возникновения существует максимальное расстояние, называемое горизонтом, на которое этот процесс успел распространиться, а зная время отделения реликтового излучения от вещества $t \sim 10^5 - 10^6$ лет (время начала рекомбинации водорода в первичном нуклеосинтезе), мы можем определить размер горизонта в этот момент — он не больше чем vt (v — скорость света в том веществе, где этот процесс рекомбинации шел, причем $v \leq c$). Далее в рамках рассматриваемой модели было подсчитано, что масштабный фактор $a(t)$ в это время во много раз превышал размер горизонта: $a(t) > vt$, отсюда следует, что между источниками реликтового излучения, находившимися, например, на противоположных концах небесной сферы, не было никакой причинной связи и эти источники ничего не «знали» друг о друге. Тогда, спрашивается, каким образом в них могли установиться почти одинаковые условия при отделении реликтового излучения от вещества, а это излучение, как уже отмечалось, в высшей мере однородно и изотропно во всех направлениях небесной сферы. В двух словах эту трудность можно сформулировать так: малым значениям t , а следовательно, и малому горизонту соответствует слишком большой размер Вселенной.

В качестве усугубляющего эту ситуацию соображения можно привести следующее: известно, что два тела не могут двигаться с относительной скоростью, превышающей скорость света, если она измеряется в одной и той же локальной системе отсчета, но принцип относительности ничего не говорит о телах, расположенных на противоположных концах Вселенной или где-либо на расстояниях, сравнимых с H_0 , поэтому, считая скорость расширения антиподных точек Вселенной на ранней стадии больше скорости света, мы должны прийти к заключению о полном отсутствии коммуникации между ними. Как же тогда объяснить однородность Вселенной вплоть до $t = 10^6$ лет, т. е. до отделения излучения от вещества? Если опять считать, что точки, разделенные расстоянием, равным или превышающим ct , не влияют друг на друга (в угловых размерах это расстояние в ту эпоху выражается сейчас всего в 10^{-2} градуса), то утверждение об однородности Вселенной в настоящий момент времени выглядит очень неправдоподобно.

Ясно, что неразрешимость этого противоречия в стандартной космологической модели снимается, если принять эту однородность в качестве начального условия, тогда Вселенная в ходе эволюции будет оставаться однородной

на больших расстояниях. Однако в теории требуется еще одно предположение о неоднородностях на малых масштабах для того, чтобы объяснить сгущение вещества в галактики, скопления галактик и т. д. Тогда задание распределения первичных неоднородностей также следует включить в начальные условия. Этот спектр неоднородностей не имеет объяснения в рамках теории и является ее недостатком, поскольку зародившиеся неоднородности вещества развиваются во времени под воздействием самогравитации и модель должна содержать только очень небольшие отклонения от однородного состояния — вещество в планковский момент времени 10^{-44} с должно быть в состоянии необычайно высокой, но все-таки не идеальной однородности, однако мы знаем, что газ в тепловом равновесии неоднороден из-за хаотического движения частиц. Такие требования к начальному состоянию вещества образуют проблему сглаживания.

Помимо этих трудностей существует еще так называемая проблема плоскостности пространства на ранней стадии эволюции. Состоит она в том, что плотность вещества с расширением Вселенной в этой модели уменьшается согласно формулам (36), (37), и спустя 10^{10} лет она должна оказаться равной предполагаемой сейчас в довольно узком диапазоне современной плотности $\Omega = 0,1-0,2$. Для этого необходимо считать ее величину через секунду после начала расширения (наступление термодинамического равновесия) находящейся в очень узких пределах $\Omega_{\text{нач}} = 1 \pm 10^{-15}$.

Если это так, то, как следует из (33), параметр кривизны k оказывается для этой эпохи близким к нулю, а мир почти плоским. Стандартная модель, в рамках которой мы и обсуждаем эти вопросы, не дает никакого объяснения этому выводу и принимает его опять как заданное начальное условие. Но, как отмечалось во введении, для любой космологической модели считается неудовлетворительным наличие сильной зависимости ее выводов от начальных условий, которые, по-видимому, никогда не будут нам известны. На эту проблему, называемую еще проблемой кривизны, впервые указали Дикке и Пиблс [13].

10. ИНФЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ИЛИ СЦЕНАРИЙ БЫСТРО РАЗДУВАЮЩЕЙСЯ ВСЕЛЕННОЙ

Для решения указанных выше и некоторых других проблем и вопросов стандартной космологической модели была предложена и подробно разработана новая модель ранней стадии эволюции Вселенной, получившая в 1981 г. название инфляционной модели [12, 13]. Ее предсказания совпадают с предсказаниями стандартной модели эволюции наблюдаемого мира начиная с 10^{-30} с, но до этого момента времени сценарии развития у этих двух моделей сильно различаются.

Согласно инфляционной модели в эволюции Вселенной была кратковременная фаза чрезвычайно быстрого расширения, в течение которой ее размеры увеличились во много раз больше, чем это ранее считалось. Когда Вселенная проходила фазу быстрого расширения, масштабный фактор, определяющий размеры во Вселенной, возрастал по экспоненциальному закону

$$a(t) = a_0 e^{Ht}, \quad (40)$$

где a_0 — начальное значение, определяющее малую причинно-связанную область порядка планковской длины $l_{\text{Планк}} \sim 10^{-33}$ см. Хотя за время инфляции размеры росли по закону (40) и различные части Вселенной переставали взаимодействовать и оказывать друг на друга влияние, но они «помнили» о своей связи до начала инфляционной фазы, так как были близкими соседями и имели одинаковую температуру и плотность. Тогда становится понятным, что этот механизм быстрого расширения, причины которого будут обсуждаться ниже, позволяет устранить естественным путем проблему горизонта, так же как и проблему начальной кривизны (плотности), поскольку в ходе быстрого расширения пространство становится плоским, подобно тому как все более плоской становится поверхность воздушного шара по мере его надувания. При этом безразмерный параметр плотности Ω , как это следует из (33), должен стремиться к единице, т. е. $\rho \rightarrow \rho_{\text{кр}}$, независимо от его значения до инфляционной фазы.

Далее оказалось, что инфляционная модель способна объяснить еще одну космологическую проблему — проблему сглаживания, т. е. сделать некоторые предсказания относительно спектра неоднородностей. Действительно, процесс раздувания должен сглаживать все первоначальные неоднородности, которые порождались, например, квантовыми флуктуациями и были мелкомасштабными, но затем в ходе раздувания они выросли до астрономических размеров. Предсказывается такая форма спектра неоднородностей, когда их амплитуды примерно равны на всех масштабах, существенных для современной астрономии (именно спектр неоднородностей такой формы был ранее предложен в феноменологической теории образования галактик Э. Харрисоном и Я. Б. Зельдовичем). Заметим, что вообще процесс образования галактик еще плохо понят в деталях, но считается, что указанный спектр неоднородностей хорошо подходит для объяснения современной структуры галактик и их скоплений.

Теперь рассмотрим механизм, ведущий к инфляции. Качественное объяснение процесса инфляционного расширения Вселенной мы можем найти в новейших достижениях теории элементарных частиц, именно в развиваемых в последние десятилетия теориях великого объединения трех взаимодействий — сильного, слабого и электромагнитного. В таких теориях силы взаимодействия являются проявлениями единого взаимодействия и объединены одной симметрией. Поскольку проявления этих взаимодействий очень

различны по характеру и силе, то теория великого объединения строится так, что в современную эпоху их предполагаемая симметрия спонтанно нарушена.

Понятие спонтанного нарушения симметрии подразумевает, что симметрия присутствует в основной теории, описывающей систему, но не проявляется в ее равновесном состоянии. Примером тому может служить жидкость, описываемая уравнениями, которые обладают симметрией относительно любого поворота в пространстве, ибо жидкость характеризуется такой же симметрией — распределение молекул одинаково и не зависит от поворота жидкости, когда же она замерзает и превращается в кристалл, то ее атомы располагаются определенным образом вдоль кристаллографических осей и симметрия относительно произвольного поворота нарушается. Наоборот, при повышении температуры эта система с нарушенной симметрией подвергается плавлению — фазовому переходу в состояние, в котором симметрия снова восстанавливается. Теория великого объединения предсказывает фазовые переходы подобного рода из симметричного состояния (температура порядка 10^{27} К). При осуществлении таких переходов появляется специальный набор полей, называемых хиггсовскими полями, и если значения хиггсовских полей равны нулю, то симметрия существует, если же значение хотя бы одного такого поля становится отличным от нуля, то симметрия спонтанно нарушается. Из количественных оценок следует, что при температуре выше 10^{27} К равновесное значение хиггсовского поля равно нулю и существует симметричная фаза. По мере снижения температуры в ходе расширения термодинамически выгодно, чтобы хиггсовское поле приобрело отличное от нуля значение и система перешла в фазу с нарушенной симметрией.

При некоторых значениях параметров теории великого объединения этот фазовый переход происходит медленно по сравнению со скоростью охлаждения. В результате система может охладиться до температуры значительно ниже 10^{27} К, а значение хиггсовского поля останется равным нулю. Такое состояние называется в физике переохлажденным, и примером его может служить переохлажденная вода — имеющая температуру вплоть до -20°C . Вещество в этом случае будет приближаться к особому состоянию, называемому ложным вакуумом, ибо истинным вакуумом (состоянием с наименьшей энергией) в этом примере будет лед. В классической теории это состояние было бы устойчивым, хотя оно и не имело бы самую низкую плотность энергии, но от состояния с более низкой плотностью энергии оно отделено энергетическим барьером, и хиггсовское поле не обладало бы энергией для преодоления этого барьера. Наглядной картиной такого состояния является шарик, находящийся на вершине выпуклого вверх с небольшим углублением в центре дна бутылки, который при малейшей встряске скатывается вниз, на дно бутылки (истинный вакуум). В квантовой теории роль такой встряски играют

непрерывные флуктуации поля, которые будут вызывать случайное «просачивание» хиггсовского поля через энергетический барьер и образование «пузырьков» фазы с нарушенной симметрией (шарик, лежащий в каком-то месте на дне бутылки, нарушает первоначальную осевую симметрию системы бутылка–шарик).

Таким образом, считается, что процесс инфляции генерируется хиггсовскими полями, переходящими при понижении температуры из ложного вакуума в фазу с нарушенной симметрией, причем эти «пузырьки» начинают быстро расти, определяя скорость инфляционного расширения (40).

Для объяснения такого быстрого расширения приводится на первый взгляд парадоксальный аргумент [12, 13], утверждающий, что ложный вакуум имеет большое отрицательное давление (расталкивание). Качественный уровень рассуждений следующий. Рассмотрим процесс, при котором «пузырек» истинного вакуума развивается в области ложного вакуума. Рост такого «пузырька» энергетически выгоден, поскольку плотность энергии истинного вакуума меньше, чем ложного, однако его рост означает еще и то, что давление истинного вакуума должно быть больше, чем ложного, заставляя стенки «пузырька» расширяться. Следовательно, принимая давление истинного вакуума равным нулю, получаем, что давление ложного вакуума должно быть отрицательным. Детальное количественное рассмотрение приводит к формуле

$$p_v = -\rho_v, \quad (41)$$

т. е. давление ложного вакуума p_v (в соответствующей системе единиц) равно взятой со знаком минус плотности его энергии ρ_v , которая положительна.

Из уравнения (31), где стоящее в правой части выражение определяет силу гравитации, и равенства (41) получаем

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4\pi G}{3}(\rho_v + 3p_v)a(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho_v a(t). \quad (42)$$

Таким образом, правая часть этого уравнения меняет знак и ускорение $\ddot{a}(t)$ становится положительным. Мы приходим к необычному эффекту гравитационного отталкивания (антигравитация), что и ведет к экспоненциальному расширению области согласно формуле (40).

Это грандиозное расширение (инфляционная фаза) продолжалось порядка 10^{-32} с, в течение этого времени диаметр области удваивался каждые 10^{-34} с, в результате установилась фаза с нарушенной симметрией и выделилась огромная энергия (ее аналог — энергия, выделяющаяся при замерзании воды), повлекшая рождение частиц во Вселенной. Начиная с этого момента Вселенная продолжила расширяться и охлаждаться в соответствии со сценарием, описываемым стандартной космологической моделью.

В заключение обсуждения механизма быстрого расширения под влиянием вакуумного перехода отметим, что влияние вакуума на космологические процессы было впервые учтено Эйнштейном в 1917 г., когда он ввел в свое уравнение (26) космологическую постоянную Λ [23]. Это было им сделано для построения модели статической Вселенной, которая в то время считалась единственно приемлемой, поскольку ни закон Хаббла, ни тем более фоновое микроволновое излучение не были известны. Для статического решения, когда $\ddot{a}(t) = 0$, правая часть уравнения (31) приводит к равенству

$$\rho = -3p, \quad (43)$$

а когда и скорость расширения $\dot{a}(t) = 0$, необходимо согласно уравнению (32) считать, что давление равняется следующей величине:

$$p = -\frac{k}{8\pi G a^2}. \quad (44)$$

Из этих двух равенств следует, что давление и плотность постоянны и одна из этих величин отрицательна. Чтобы избежать такого, казавшегося тогда нефизическим, результата, Эйнштейн и видоизменил свое уравнение, введя в него космологический член (ср. (26)):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R = -8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}. \quad (45)$$

Опустим все подробности вычислений [5]; результативно такое изменение уравнения (26) приводит во всех последующих уравнениях ((29), (30) и т.д.) к эффективной замене выражений для плотности и давления на величины, содержащие вклад от космологической постоянной, они модифицируются следующим образом:

$$p \Rightarrow p - \frac{\Lambda}{8\pi G}, \quad \rho \Rightarrow \rho + \frac{\Lambda}{8\pi G}. \quad (46)$$

Отсюда становится понятным, что введение космологического члена с $\Lambda > 0$ приводит к отрицательному вкладу в давление и эффективно увеличивает плотность вещества. Поэтому, рассматривая, как это делал Эйнштейн, Вселенную, заполненную нерелятивистским веществом (пылью) с пренебрежимо малым давлением $p \approx 0$ (см. (36)), мы получаем из (46) отрицательное давление $p = -\Lambda/8\pi G$, а подставляя это выражение в (43) и (44), получаем

$$\rho = 3\Lambda/8\pi G, \quad \Lambda a^2 = k. \quad (47)$$

Как видно из этих формул, статическая Вселенная Эйнштейна имеет действительно постоянный масштабный фактор $a = \sqrt{k/\Lambda}$, положительную кривизну

$k > 0$, а плотность вещества в ней фиксируется значениями фундаментальных констант G и Λ . Таким образом, введение в уравнения гравитации космологической константы, создающей согласно (46) дополнительное отрицательное давление, дает возможность, в свете вышесказанного, учесть влияние вакуума на космологическую эволюцию Вселенной, сделав ее, например, как в модели Эйнштейна, статической.

Другим поучительным примером может служить модель де Ситтера [5], в которой пространство пустое, не заполнено материей ($T_{\mu\nu} = 0$), но зато в уравнении (45) присутствует Λ -член. Такая модель, конечно, исключает отношение к ней как к реалистической космологической модели, однако логическая возможность такой модификации уравнений гравитации вполне приемлема и позволяет рассмотреть эффект влияния только вакуума на эволюцию. Действительно, из равенства (46) при отсутствии вещества получаем

$$p_v = -\Lambda/8\pi G, \quad \rho_v = \Lambda/8\pi G \quad (48)$$

и, подставляя эти значения в уравнение (42), имеем экспоненциально растущее решение для масштабного фактора

$$a(t) = a_0 e^{Ht}, \quad \text{где } H = \pm\sqrt{\Lambda/3} \quad (49)$$

(решение с отрицательным значением H не рассматривается как нефизическое). Именно такое расширение предполагается в инфляционной стадии эволюции Вселенной (40).

В заключение следует еще отметить одно общее свойство нестационарных моделей с космологической постоянной — для любой из них с $\Lambda > 0$ асимптотическое поведение решения для $a(t)$ при $a \rightarrow \infty$ совпадает с решением де Ситтера (49), поэтому новейшие данные по вспышкам далеких сверхновых вновь заставляют обратиться к рассмотрению такой возможности модификации уравнений гравитации. К этому мы еще вернемся в последующих разделах, а теперь остановимся на другой трудной проблеме космологии — загадке отсутствия антивещества в видимой части Вселенной.

11. БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Одной из основных задач для любой из ныне существующих теорий является объяснение отсутствия в каких-либо заметных количествах антивещества (антибарионов) во Вселенной. Действительно, с полным на то основанием считается, что любая как угодно далеко от нас находящаяся галактика, так же, впрочем, как и наша, состоит из барионов (протонов, нейтронов, гиперонов), а не из антибарионов. Поэтому, принимая во внимание, что во всех земных

экспериментах наблюдаются процессы с сохранением барионного числа B (аддитивное квантовое число, равное 1 для барионов и -1 для антибарионов, для всех остальных элементарных частиц $B = 0$), необходимо в рамках модели Большого взрыва объяснить, куда делись во Вселенной антибарионы, если они рождались в равных количествах с барионами.

Все известные сейчас земные эксперименты на ускорителях подтверждают факт сохранения барионного числа в реакциях рождения и распада барионов:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}, \quad e^+ + e^- \rightarrow p + \bar{p}, \quad \pi^+ + p \rightarrow p + p + \bar{p} + \pi^+.$$

Далее, при сохранении барионного числа во всех взаимодействиях протон, как легчайший барион, абсолютно стабилен, и гипотетический процесс

$$p \rightarrow e^+ + \gamma,$$

разрешенный законами сохранения энергии, углового момента и электрического заряда, тем не менее, должен быть запрещен, следовательно, стабильность протона является чувствительной проверкой сохранения барионного числа.

Значительное преобладание в современной Вселенной вещества над антивеществом (позитроны и антипротоны регистрируются только как вторичные частицы в космических лучах и присутствуют в ничтожных количествах) явным образом противоречит предположению о том, что симметрия между частицами и античастицами должна выполняться.

Современный подход к проблеме барионной асимметрии мира базируется на предположении, что барионное число, характеризующее эту асимметрию, не столь фундаментально по своей природе, нежели электрический заряд (с электрическим зарядом, как известно, связано существование дальнодействующей электромагнитной силы, и уравнение Максвелла $\nabla E = 4\pi\rho_e$, подтвержденное экспериментально, обеспечивает строгое сохранение электрического заряда, чего нет для барионного числа). Предполагается, что Вселенная с самого начала могла быть почти симметричной относительно барионов и антибарионов, и для возникновения отличного от нуля барионного заряда (космический бариогенез) требуется, по оценкам (А.Д. Сахаров [26]), преобладание числа барионов N над числом антибарионов \bar{N} в относительном измерении всего лишь на величину

$$\frac{N - \bar{N}}{N + \bar{N}} \approx 10^{-9} - 10^{-10}, \quad (50)$$

чтобы после аннигиляции остались только барионы в нужном количестве. Такую численную меру зарядовой асимметрии можно получить, зная современные значения плотности барионов $\rho_b \approx 2 \cdot 10^{-31}$ г/см³, что дает в среднем

их концентрацию (число частиц в единице объема) $n_b \approx 10^{-7}$ г/см⁻³ и реликтовых фотонов $n_\gamma \approx 400$ г/см⁻³. Дело в том, что в ранней горячей Вселенной, при высоких температурах, превышающих массу покоя барионов ($kT > m_b c^2$), барионы и антибарионы (а точнее, составляющие их кварки и антикварки) должны были иметься в почти равных количествах, причем концентрация тех и других должна была совпадать с концентрацией реликтовых фотонов. Позднее, когда произошла аннигиляция барионов и антибарионов, преобладание частиц над античастицами дало современное наблюдаемое значение плотности барионов. Поскольку с тех пор число реликтовых фотонов практически не менялось, то современное отношение концентрации барионов к концентрации реликтовых фотонов $n_b/n_\gamma \approx 10^{-10}$ дает отношение исходного избыточного числа барионов к их исходному полному числу [26, 27]. При этом остается открытым вопрос: куда девалась та огромная энергия, которая выделилась в результате аннигиляции вещества и антивещества?

Кроме указанного предположения о несохранении барионного числа в процессах, происходивших в ранней Вселенной, для генерации барионной асимметрии потребовалось еще выполнение двух условий: нарушение так называемой C - и CP -инвариантности и отсутствие термодинамического равновесия в состоянии, в котором произошла аннигиляция. При таких условиях протон будет нестабилен, однако, как уже отмечалось, на это пока нет прямых указаний в экспериментах, проведенных на Земле. В результате можно сказать, что барионная асимметрия Вселенной есть единственно наблюдаемое сейчас свидетельство в пользу теорий с B -нарушением.

Конечно, можно предположить, что Вселенная в целом симметрична, но локально, скажем в объеме ее видимой сейчас части, несимметрична, поскольку в рамках обсуждавшегося выше инфляционного механизма расширения на ранней стадии и стандартной теории элементарных частиц (но не теории великого объединения, где число барионов не сохраняется) удастся объяснить возникновение такой локальной барионной асимметрии [27].

Детальное рассмотрение результатов исследований проблемы несохранения барионного числа при высоких температурах и в столкновениях частиц высоких энергий можно найти в обзоре [27].

12. НОВЕЙШИЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ КОСМОЛОГИИ И ТРУДНОСТИ ИХ ОБЪЯСНЕНИЯ

Подводя итог рассмотренным в предыдущих разделах сценариям космической эволюции, можно выделить первоначальный вариант стандартной космологической модели (1920–1980 гг.), предполагавший, что расширение началось с возникшего, вообще говоря, загадочным образом «огненного шара» релятивистских безмассовых и массивных частиц с уравнением состояния

радиации (37). Остывая по мере расширения, содержимое этого «шара» превращалось в массивную «пыль» с небольшой примесью радиации (уравнение состояния этой фазы (36)).

Затем (1980–1998 г.) этот сценарий, коротко описываемый последовательностью состояний: сверхжесткое состояние — радиация — пыль, был заменен моделью быстро раздувающейся на начальном этапе Вселенной: инфляция — радиация — пыль, когда расширение начиналось по экспоненциальному закону (40).

В последние годы, начиная с 1998 г., двумя независимыми группами — «Supernova Cosmology Project» и «High Supernova» — были получены новые неожиданные данные о современной космической эволюции на очень больших расстояниях — сотни и тысячи мегапарсек (что выражается в значениях красного смещения $z = 1-1,7$) [16, 17]. Речь там шла о событиях, открытие которых многие специалисты склонны считать революцией в космологической науке, и основанием для этого явилось наблюдение и изучение вспышек далеких сверхновых [10].

Суть этих событий состоит в том, что из-за исключительной яркости сверхновых их можно наблюдать на очень больших космологических расстояниях, и, используя данные о сверхновых определенного типа, которые принято считать «стандартными свечами», можно определить, как регистрируемая яркость зависит от расстояния до них. Оказалось, что убывание яркости с увеличением расстояния в среднем происходит заметно быстрее, чем этого следовало бы ожидать по стандартной теории расширяющейся Вселенной. Такое дополнительное потускнение может означать, что данному красному смещению соответствует некоторая добавка в расстоянии. Это, в свою очередь, возможно тогда, когда космологическое расширение происходит с ускорением, т. е. скорость удаления от нас источника не убывает, как того требует стандартная модель, а возрастает со временем. Если верить этим данным, то как раз в нашу эпоху динамика расширения перешла от стадии замедления к стадии ускорения, а это уже действительно означает коренное изменение во всей созданной картине мира.

Таким образом, сегодня теоретическая космология получила возможность опираться на наблюдательные данные о состоянии вещества, дающего основной вклад в космическую эволюцию на расстояниях, сравнимых с размерами Вселенной, и эти данные свидетельствуют о том, что наша Вселенная заполнена в основном не массивной разряженной «пылью» далеких невидимых галактик (ибо она не обеспечивает расширения с ускорением), а каким-то загадочным веществом другой природы — «темной энергией».

Одни считают [10], что снова открыто влияние вакуума, но уже не на начальной стадии расширения, как в инфляционной модели, а на стадии после завершения фридмановского расширения с замедлением. Такая смена режимов расширения теоретически необъяснимо объясняется на основе приня-

тия так называемого «космического конкорданса», когда относительная плотность вакуума принимается равной

$$\Omega_v = \frac{\rho_v}{\rho_{кр}} = 0,7 \pm 0,1 \quad (51)$$

(для других плотностей, как уже приводилось, принимаются значения $\Omega_{тем} = 0,3 \pm 0,1$, $\Omega_{бар} = 0,02 \pm 0,01$, $\Omega_{рад} = 0,8 \cdot 10^{-5} \alpha$, $1 < \alpha < 30$). Следовательно, в рамках инфляционной космологии с последующим фридмановским расширением, чтобы объяснить этот феномен, необходимо предполагать, что 70 % вещества во Вселенной находится в состоянии инфляционного расширения с очень малой константой (40), а 30 % находится в виде «пыли» с уравнением состояния (36), роль этой «пыли» должна играть холодная темная материя. Такого сорта условия кажутся очень искусственными, и объяснить происхождение этих состояний пока не удается.

Другая группа исследователей предполагает, что космологическое ускорение на данном этапе создается не вакуумом, а особой гипотетической субстанцией [14, 18], названной квинтэссенцией. Этот термин заимствован из классической древности, где картина мира строилась из пяти стихий: земли, воды, воздуха, огня и квинтэссенции — космической субстанции, из которой, как считалось, состояли небесные тела. Теперь под ней понимается особая форма космической энергии с уравнением состояния, отличным от уравнения состояния вакуума (41) $p = a\rho$, где a — параметр, лежащий в интервале $-1 < a < -1/3$. Не будучи вакуумом, для которого $a = -1$, квинтэссенция тоже создает отрицательное давление (антигравитацию) и ведет к ускоренному расширению, но не столь быстрому, как отрицательное давление вакуума, поэтому в рамках модели Фридмана этот феномен, по-видимому, объяснен быть не может, поскольку введение в уравнение эйнштейновской постоянной (Λ -члена) ведет только к одному режиму экспоненциального расширения, а не к двум на разных этапах развития Вселенной.

Итак, мы сталкиваемся с новой сложной загадкой в стремлении построить единую космологическую модель, объясняющую всю совокупность доступных нам наблюдательных данных.

13. КОНФОРМНАЯ СИММЕТРИЯ КАК НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМАМ КОСМОЛОГИИ

Остановимся еще на одной попытке построения теории, исходящего из принципиально нового взгляда на проблему расширения Вселенной.

Развивается подход, в котором все проблемы классической и квантовой космологии пытаются решить на основе нового принципа относительности — относительности масштабов измерения. Это означает, что нам даны только

отношения измеряемой величины к эталону измерения*, эталон характеризуется скорее физическими приборами, связанными с системой отсчета, и начальными данными, а законы природы должны быть инвариантны относительно изменения начальных данных, включая и эталоны. Чтобы получить законы, инвариантные относительно изменения эталонов для измерения, достаточно заменить в ОТО и стандартной модели элементарных частиц все массы, включая массу Планка и массу Хиггса, динамической переменной, фиксируя пространственный объем Вселенной, так чтобы число динамических переменных теории не изменилось.

Если во фридмановской космологии эволюция Вселенной приводит к увеличению длины волны космических фотонов во время их движения к наблюдателю, то в новом подходе эволюция Вселенной предполагает увеличение всех масс. В первом случае космический фотон «краснеет» во время полета, во втором случае фотон вылетает уже «покрасневшим», так как испускается атомом с меньшей массой.

В первом случае требуется абсолютный эталон измерения и абсолютная масса как фундаментальная константа уравнений движения теории Эйнштейна, известная как масса Планка

$$M_{\text{Планк}} = \sqrt{\hbar c/G} = 2,177 \cdot 10^{-8} \text{ кг.} \quad (52)$$

Во втором случае масштабно-инвариантных уравнений возникает относительный эталон измерения, увеличивающийся вместе со Вселенной, а масса Планка

$$M_{\text{Планк}} = \varphi_0 \sqrt{\frac{8\pi}{3}} \quad (53)$$

становится новой динамической переменной — *дилатоном* $\varphi(\eta) = \varphi_0 a(\eta)$.

Современная космология на самом деле использует двойной стандарт при описании космической эволюции фотонов, испускаемых массивной материей на далеком космическом объекте. Относительные единицы измерения, расширяющиеся вместе с космическим масштабным фактором, используются в наблюдательной космологии при описании начальных данных космических фотонов, летящих к наблюдателю, в то время как абсолютные единицы используются для интерпретации полученных данных в космологии, которая

*Максвелл столкнулся с тем, что описания результатов экспериментальных измерений электромагнитных явлений уравнениями теории поля зависят от определения измеряемых величин в теории и выбора эталона их измерения. Во введении к «Трактату об электричестве и магнетизме» Максвелл писал: «С математической точки зрения наиболее важным понятием при рассмотрении любого явления является понятие измеряемой величины. Поэтому я буду подходить к электрическим явлениям главным образом с точки зрения их измеримости, описывая методы измерения и определяя эталоны, от которых они зависят» [28].

рассматривает описание в относительных единицах лишь как математический прием решения задач. Использование двойного стандарта в космологии означает, что существуют две математически эквивалентные и равноправные версии теоретического описания космологических данных, в силу этой эквивалентности использование двойного стандарта в космологии не ведет к противоречиям, а дает возможность ее переформулировать, рассматривая относительные единицы как измеряемые, а абсолютные единицы — как математический прием.

Пересчет астрофизических данных в терминах относительного (т. е. расширяющегося) эталона, выполненный в недавних работах [29–34], показал, что симметрия уравнений движения теории в относительных единицах увеличивается, а число параметров, вводимых для теоретического описания астрофизических данных, уменьшается. Кроме того, относительные единицы приводят к ряду совпадений параметров космической эволюции и физики элементарных частиц, которые можно было бы рассматривать как случайные, если бы таких совпадений не было так много.

В рамках относительного эталона возникает постановка задачи: исследовать квантовое рождение и эволюцию Вселенной в пределе бесконечно малых масс $\varphi(\eta) \rightarrow 0$ и больших значений параметра Хаббла $H(\eta) \rightarrow \infty$.

Перейдем к формулировке конформно-инвариантных версий ОТО и СМ с уравнениями движения, инвариантными относительно масштабных преобразований.

Со времени создания Ньютоном первой физической теории ее структура не претерпела существенных изменений. Физическая теория на самом деле состоит из двух частей: законов природы в виде дифференциальных уравнений движения и начальных данных, которые требовал еще Лаплас для однозначного решения уравнений Ньютона, они измеряются набором физических приборов, задающих одновременную *систему отсчета*.

Законы природы принято рассматривать как *царство необходимости*, а начальные данные — как *царство свободы*. Параметры уравнений трактуют как *фундаментальные* константы, а начальные данные — как *случайные* величины. В физике эксперимент сам задает геометрию приборов и начальные состояния исследуемого объекта. Кем были заданы начальные данные Вселенной, неизвестно, но суть постановки задачи остается той же самой, и она практически не отличается от школьной задачи о поезде, движущемся в одномерном пространстве с координатой $X(\eta) = a^2(\eta)$ и постоянной скоростью $V_1 = (2H_0)^{-1}$ из точки $X(0) = X_1$ в точку $X(\eta_0) = X_0$. Чтобы найти зависимость координаты поезда от времени

$$X(\eta) = X_1 + V_1\eta, \quad (54)$$

нужно решить уравнение Ньютона, которое не зависит от начальных данных.

Независимость законов природы от начальных данных называют *симметрией теории относительно преобразований, меняющих систему отсчета*, т. е. перестраивающих положение и скорости начальных данных. Такая группа преобразований в механике Ньютона называется группой Галилея.

Группа преобразований, меняющих систему отсчета в релятивистской теории, называется группой Пуанкаре, которая была получена Лоренцем и Пуанкаре из анализа уравнений Максвелла, и все полевые теории XX столетия были построены по аналогии с электродинамикой Максвелла [35]. В частности, полевая природа света в электродинамике была примером для Эйнштейна при формулировке уравнений теории гравитации. Однако аналогия Эйнштейна с электродинамикой Максвелла была неполной, поскольку Бэйтманом и Кунингамом [36] в 1909 г. было показано, что уравнения Максвелла являются инвариантными относительно еще и конформных преобразований [37]*.

Переход к *относительному эталону измерения длины* означает переход от ОТО к конформно-инвариантной теории скалярного поля, называемого *дилатоном*. ОТО и СМ как в абсолютных, так и в относительных единицах возникают как результат определенного выбора калибровок в конформно-инвариантной теории:

$$S[w|F] = \int d^4x \left\{ \sqrt{-g} w^2 \left[\partial_\mu Q \partial^\mu Q - \frac{R(g)}{6} \right] + w \partial_\mu (\sqrt{-g} \partial^\mu w) \right\} + S_{\text{СМ}}[y_h w | f, g], \quad (55)$$

где вместо действия ОТО стоит действие Пенроуза–Черникова–Тагирова [38] для дилатона w , а хиггсовская масса в действии СМ ($M_{\text{Хиггс}}$) заменяется дилатоном ($y_h w$); набор полей $F = (Q, f, g)$, включая поля СМ f , задан в пространстве с интервалом

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (56)$$

а Q — дополнительное скалярное поле, которое приводит к определенному режиму эволюции дилатона относительно интервала (56).

В этой теории дилатон w имеет отрицательный знак кинетической энергии и играет роль параметра эволюции в пространстве событий всех полевых переменных $[w|F]$.

*Конформные преобразования оставляют инвариантным угол между двумя векторами в пространстве-времени и включают изменение масштаба, подобно тому как преобразования группы Галилея, оставляющие инвариантными уравнения Ньютона, включают изменение положения частицы.

Спонтанное нарушение конформной симметрии и фиксация дилатона

$$w_{(a)}(x^0, x^i) = \varphi_0 = \text{const}, \quad V_{(a)}(t) = \int d^3x \sqrt{{}^{(3)}g_{(a)}} \quad (57)$$

ведет к общепринятой формулировке ОТО и СМ

$$S[\varphi_0|F_{(a)}] = \int d^4x \left\{ \sqrt{-g_{(a)}} \varphi_0^2 \left[\partial_\mu Q_{(a)} \partial^\mu Q_{(a)} - \frac{R(g_{(a)})}{6} \right] \right\} + \\ + S_{\text{СМ}}[y_h \varphi_0 | f_{(a)}, g_{(a)}], \quad (58)$$

но вводит начальные данные $w = \varphi_0$ в уравнения движения с изменяющимся объемом трехмерного пространства $V_{(a)}(t) = \int d^3x \sqrt{{}^{(3)}g_{(a)}}$, подобно тому как выбор птолемеевской системы отсчета нарушает принцип инвариантности Галилея, вводя начальные данные в уравнения движения ньютоновской механики.

Выбор конформных переменных оставляет дилатонную нулевую моду как однородную переменную $\varphi(x^0)$ с постоянным объемом 3-мерного гиперпространства $V_{(c)} = \int d^3x \sqrt{{}^{(3)}g_{(c)}} \equiv \text{const}$ [29, 31]. В этом случае принцип масштабной инвариантности уравнений движения формулируется как коперниковский принцип относительности положения Вселенной в полевого пространстве событий $[w|F]$:

$$w_{(c)}(x^0, x^i) = \varphi(x^0), \quad V_{(c)} = \int d^3x \sqrt{{}^{(3)}g_{(c)}} = \text{const} \quad (59)$$

с действием

$$S[\varphi|F_{(c)}] = \int d^4x \left\{ \sqrt{-g_{(c)}} \varphi^2 \left[\partial_\mu Q \partial^\mu Q - \frac{R(g_{(c)})}{6} \right] + \varphi \partial_0 (\sqrt{-g_{(c)}} \partial^0 \varphi) \right\} + \\ + S_{\text{СМ}}[y_h \varphi | f_{(c)}, g_{(c)}], \quad (60)$$

где переменная φ играет роль масштабного космического фактора, т. е. параметра эволюции в пространстве полевых переменных $[\varphi|F]$, а канонический импульс этой переменной является локализуемой энергией Вселенной [39]

$$P_\varphi = -2V_{(c)} \frac{d\varphi}{d\eta} \equiv -2V_{(c)} \varphi', \quad (61)$$

здесь $d\eta$ — инвариантный интервал для усредненной функции хода времени.

В конформных переменных (59) проблемы теории, решаемые в абсолютных переменных (57) с помощью введения режима инфляции, решаются

с помощью нулевой моды дилатона как параметра эволюции. В частности, изменением φ со временем объясняют проблему горизонта, как следствие одновременного изменения масс частиц и параметров системы полей во всем пространстве в целом. Усреднение уравнения теории (55), (59) по пространственному объему дает уравнение эволюции Вселенной

$$\varphi'^2 = \rho, \quad (62)$$

где $\rho = \int d^3x \sqrt{{}^{(3)}g} [T_0^0 - \varphi^2 (R_0^0 - R/2)]$. Это уравнение является аналогом уравнения Фридмана, полученного в приближении однородности.

Таким образом, приближение однородной Вселенной здесь возникает как усреднение точного конформно-инвариантного уравнения по объему, в частности, решение (62) ведет к аналогу соотношения Фридмана

$$\eta(\varphi_0, \varphi_1) = \pm \int_{\varphi_1}^{\varphi_0} d\varphi / \sqrt{\rho}.$$

Чтобы пояснить проблему космических начальных данных $\varphi(0) = \varphi_1$, $H(0) = H_1$ в релятивистской квантовой Вселенной в полевого пространстве событий, рассмотрим хорошо известное решение этой проблемы для релятивистской квантовой частицы.

14. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ КВАНТОВЫЙ МИР

Напомним, что в ньютоновской механике понятие пространственных координат частиц X_i , $i = 1, 2, 3$, как *динамических переменных*, четко отделяется от абсолютного времени t как *параметра эволюции* этих переменных. Релятивистская симметрия означает равноправие времени $t = X_0$ и пространственных координат релятивистской частицы X_i . Такое равноправие предполагает, что время $t = X_0$ становится динамической переменной с начальными данными X_{10} , которые интерпретируются как точка рождения или уничтожения частицы в пространстве-времени Минковского X_0, X_i , которое называется пространством событий. При своем движении в этом пространстве частица описывает мировую линию, где роль параметра эволюции играет геометрический интервал η на этой линии. Если нет мировой линии, то нет и интервала η .

В отличие от классической физики для полного описания движения релятивистской частицы в мировом пространстве событий используют двух наблюдателей. Один покоится, второй сопутствует частице. Первый измеряет своими часами время как *переменную* X_0 в мировом пространстве $[X_0|X_i]$, а второй измеряет своими часами время как *геометрический интервал* η на

мировой линии частицы. Оба эти измерения восстанавливают траекторию частицы с массой m в мировом пространстве:

$$X_0(\eta) = X_{I0} + \frac{P_0}{m}\eta, \quad X_i(\eta) = X_{Ii} + \frac{P_i}{m}\eta,$$

где импульсы частицы P_0, P_i связаны соотношением

$$(P_0)^2 - (P_i)^2 = m^2. \quad (63)$$

Поскольку два различных времени принадлежат разным наборам измеряемых величин, то два противоположных утверждения о двух разных временах одной и той же частицы являются не противоречивыми, а взаимодополняющими. Частица имеет одну реальность для наблюдателя в его системе покоя и другую для сопутствующего наблюдателя.

Нулевая компонента импульса P_0 играет роль энергии, а начальное положение X_{I0} в квантовой механике есть координата точки рождения или уничтожения частицы с волновой функцией

$$f(X_0, X_i) = \sum_q [a_q^+ \Psi(X_0 \geq X_{I0}|X_i) + a_q \Psi(X_0 \leq X_{I0}|X_i)], \quad (64)$$

описывающей движение частицы вперед по времени, если частица рождается, или назад, если частица уничтожается, такое квантование называется причинным квантованием и совпадает с квантованием полей в современной теории [40].

Набор измеряемых величин и волновая функция релятивистской частицы для сопутствующего наблюдателя задаются преобразованием $(X_0|X_i) \rightarrow (\eta|\xi_i)$, которое переводит время как *переменную* пространства Минковского в *геометрический интервал* η на мировой линии [39, 41], а координаты X_i — в начальные данные ξ_i на мировой линии. Такого рода преобразование называется каноническим и впервые было предложено в теории дифференциальных уравнений Леви-Чивита еще в 1906 г. [42].

Если в релятивистской механике проблемой было понять, как время стало *зависимой переменной*, то в конформной теории поля возникает проблема, как одна из полевых *переменных* φ становится временем η . Рассмотрим этот вопрос на примере однородного приближения в случае, когда $Q(x^0, x^i) = Q(x^0)$.

Конформная космология обычно определяется как такое однородное приближение метрики

$$ds_{(c)}^2 = [(d\eta)^2 - (dx^i)^2], \quad d\eta = N_0(x^0)dx^0 \quad (65)$$

с функцией смещения $N_0(x^0)$, которое сохраняет группу симметрии ОТО в форме инвариантности относительно репараметризации координатного времени $x^0 \rightarrow \tilde{x}^0 = \tilde{x}^0(x^0)$. Космологические модели с этой группой симметрии, описанные впервые де Виттом, Уилером и Мизнером [43, 44] на математическом уровне ничем не отличаются от релятивистской механики частицы в СТО. Существует прямое соответствие между пространством событий для переменных $[X_0|X_i]$ в СТО и пространством событий для полевых переменных $[\varphi|Q]$, где роль временной переменной играет дилатон φ .

В случае доминантности однородного скалярного поля $Q(\eta)$ мы получаем простую космологическую модель Вселенной [31]:

$$\begin{aligned} S &= V_{(c)} \int \frac{dx^0}{N_0} \left[- \left(\frac{d\varphi}{dx^0} \right)^2 + \varphi^2 \left(\frac{dQ}{dx^0} \right)^2 \right] = \\ &= \int \left(-P_\varphi \frac{d\varphi}{dx^0} + P_Q \frac{dQ}{dx^0} + N_0 V_{(c)} \right) [(P_\varphi/2V_{(c)})^2 - (P_Q/2\varphi V_{(c)})^2], \quad (66) \end{aligned}$$

где $P_Q = 2V_{(c)}\varphi^2 Q'$, $P_\varphi = 2V_{(c)}\varphi'$ — канонические импульсы. Вариация этого действия по функции смещения $N(x^0)$ ведет к уравнению связи для этих импульсов:

$$P_\varphi^2 - P_Q^2/\varphi^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad P_\varphi = \pm P_Q/\varphi \quad (67)$$

и его решению в виде

$$P_Q = 2V_{(c)}H_I\varphi_I^2 = \text{const}, \quad \varphi^2 = \varphi_I^2(1 + 2H_I\eta), \quad (68)$$

где $\varphi_I^2 H_I = P_Q/2V_{(c)}$ есть интеграл движения. Как показано в [25], полученный закон эволюции (68) для масштабного фактора не противоречит в конформных переменных данным по сверхновым [16, 17].

Уравнение Уилера — де Витта при квантовании теории (66)

$$\left[\hat{P}_\varphi^2 - \hat{P}_Q^2/\varphi^2 \right] \Psi[\varphi|Q] = 0$$

возникает как прямая аналогия уравнению Клейна–Гордона в квантовой СТО. Решение этого уравнения аналогично решению уравнения Клейна–Гордона для релятивистской частицы, которое в квантовом случае описывает рождение и уничтожение частиц с положительной энергией. Чтобы избавиться от отрицательных энергий и иметь устойчивую стабильную квантовую систему, в релятивистской квантовой теории постулируется причинное квантование, согласно которому возбуждения с положительной «энергией» движутся по «времени» вперед, а возбуждения с отрицательной «энергией» — назад. Точно

такая же трактовка дается оператору рождения Вселенной и оператору уничтожения анти-Вселенной, что решает проблему космической сингулярности Вселенной с положительной «энергией», поскольку ее волновая функция не содержит точки сингулярности $\varphi = 0$, которая оказывается в волновой функции с отрицательной «энергией», трактуемой как амплитуда вероятности уничтожения анти-Вселенной.

Понятие пространства событий $[\varphi|Q]$, где движение Вселенной описывает мировую линию с интервалом η , позволяет в данном случае с помощью *канонического преобразования* (известного как преобразование Леви-Чивита [41]) построить второй набор наблюдаемых для Вселенной $[\eta|q = Q_I]$, где Q_I — начальные данные, и вторую волновую функцию $\Psi_G[\eta|Q_I]$. При этом причинное квантование параметра эволюции как полевой переменной ведет к положительной стреле геометрического времени $\eta \geq 0$. Закон Хаббла (68) связывает два этих набора наблюдаемых — полевой $[\varphi|Q]$ и геометрический $[\eta|Q_I]$ — с космическими начальными данными $\varphi(\eta = 0) = \varphi_I$, $H(\eta = 0) = H_I$.

Таким образом, полное описание релятивистской Вселенной с точки зрения ньютоновской физики возможно двумя ее *реализациями*, которые взаимно исключают и дополняют друг друга. Одна *реализация* — мировое пространство событий $[\varphi|F]$, где параметром эволюции служит дилатон φ , а вторая — геометрическая $[\eta|G]$, где параметром эволюции служит *время* η . Каждая из этих *реализаций* имеет свое мировое пространство, свой параметр эволюции, свою энергию, свою волновую функцию, полевую $\Psi_F[\varphi|F]$ или геометрическую $\Psi_G[\eta|G]$, и свои начальные данные. Эти реализации связаны каноническим преобразованием Леви-Чивита, которое переводит *полевую переменную* дилатон φ в геометрический *интервал времени* η [39, 41, 45, 46].

Начальные данные, включая число частиц, $n_I = \langle 0|a_q^+ a_q|0 \rangle = 0$ (здесь a_q^+ и a_q — операторы рождения и уничтожения соответственно, q — квантовые числа) можно трактовать как полевые координаты точки рождения Вселенной в ее полевой реализации, оно происходит вне времени η , которое принадлежит другой реализации Вселенной уже в геометрическом пространстве $[\eta|G]$.

15. КОНФОРМНАЯ КОСМОЛОГИЯ

Конформные переменные (59) в однородном приближении соответствуют непосредственно измеряемым величинам наблюдательной космологии. Напомним, что при описании явления космической эволюции энергии фотонов, испускаемых атомами на космическом объекте, используется конформный интервал $(dx^i)^2 = dt^2/a^2(t) = d\eta^2$ и они распространяются по световому конусу $ds^2 = 0$ к наблюдателю. Непосредственно измеряемая величина наблюдательной космологии — красное смещение спектральных линий — зависит от значения *конформного времени* $\eta = \eta_0 - r$ в момент излучения

фотонов атомами, находящимися на *координатном расстоянии* $r = \sqrt{(x^i)^2}$ от Земли. В терминах конформных координат мы обнаруживаем, что объем Вселенной не расширяется, в то время как все массы, включая массу Планка, масштабируются космическим фактором

$$m_{(r)}(\eta) = m_0 a(\eta), \quad [M_{\text{Планк}} 8\pi/3] a(\eta) = \varphi_0 a(\eta) = \varphi(\eta). \quad (69)$$

В терминах конформного времени, отождествляемого с наблюдаемым временем, корневой режим эволюции Вселенной в эпоху первичного нуклеосинтеза

$$a(t) = \tilde{a}(\eta) = \sqrt{1 + 2H_0(\eta - \eta_0)} = 1 - rH_0 + O(r^2) \quad (70)$$

означает, что Вселенная в эпоху химической эволюции была заполнена не радиацией, а свободным однородным скалярным полем. Такая эволюция (70) задается жестким уравнением состояния, когда плотности давления и энергии совпадают.

Было показано [25,29,31], что конформные переменные (59) дают другую физическую картину эволюции Вселенной, чем переменные (57) стандартной

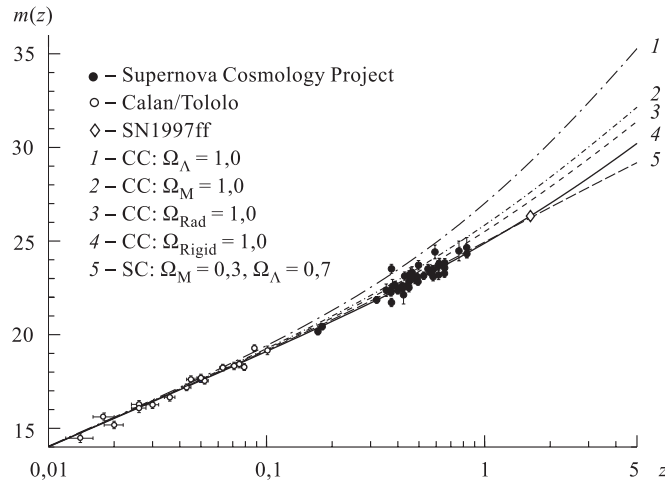


Рис. 2. Диаграмма Хаббла [30] для плоской модели Вселенной в стандартной космологии (SC) и в конформной космологии (CC). Точки включают 42 красных смещения сверхновых [16], в том числе самой дальней сверхновой SN1997ff [17]. Лучшее согласие с этими данными требует космологической константы $\Omega_\Lambda = 0,7$ в случае стандартной космологии, в то время как в случае конформной космологии эти данные совместимы с преобладанием сверхжесткого состояния свободного скалярного поля Q [31]

космологии. Спектр фотонов, испущенных атомами на далеких звездах два миллиарда лет тому назад, запоминает размер атома, который определяется его массой, и этот спектр сравнивается со спектром таких же атомов на Земле, но с увеличенной массой, в результате наблюдается красное смещение спектральных линий [25, 30]. Температурная история горячей Вселенной, переписанная в относительных единицах, выглядит как история эволюции масс элементарных частиц в холодной Вселенной с постоянной температурой реликтового излучения.

Было показано [25], что в конформных переменных данные по зависимости красного смещения от расстояния до сверхновых [16] (см. рис. 2) и данные по нуклеосинтезу соответствуют одному и тому же жесткому уравнению состояния (70).

Температурная история горячей Вселенной, переписанная в конформных переменных (59), выглядит как история эволюции масс элементарных частиц в холодной Вселенной с постоянной температурой. Независимость температуры реликтового фона от красного смещения на первый взгляд находится в противоречии с наблюдением [47] $6,0 < T_{\text{СМВ}}(z = 2,3371) < 14$ К. Однако относительная заполненность различных энергетических уровней E_i , из которых температура была выведена в этом наблюдении, следует в основном из статистики Больцмана, но аргумент больцмановских факторов как отношение температуры к массе имеет ту же самую z -зависимость [25] и в холодной Вселенной. Поэтому обнаружение такой зависимости также можно интерпретировать как z -зависимость энергетических уровней (т. е. массы) при постоянной температуре. Распространение химических элементов также главным образом определяется больцмановскими факторами, зависящими от конформных инвариантов отношения температуры к массе [8].

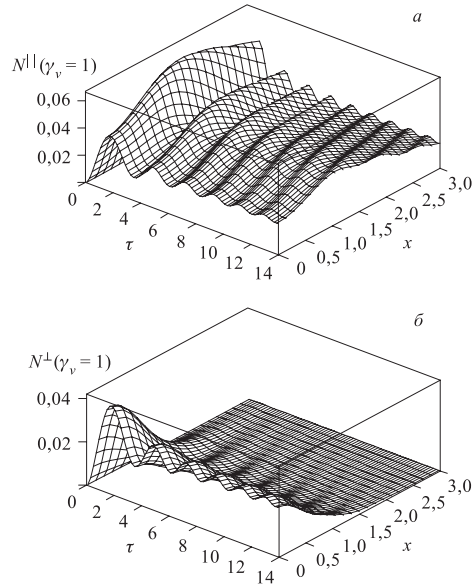
16. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БЮДЖЕТ ВСЕЛЕННОЙ

Может ли современная физическая теория объяснить происхождение всей наблюдаемой материи во Вселенной буквально по библейскому сценарию ее рождением из «ничего», т. е. из физического вакуума?

Ответу на вопрос о происхождении материи в настоящее время посвящено большое количество работ (см., например, [48–51]). В некоторых сценариях инфляционной модели используется космологическое рождение пар частиц-античастиц из вакуума. Однако считается, что самого такого космологического рождения из вакуума явно не достаточно для происхождения всей наблюдаемой материи [49].

Здесь нами приводится ряд аргументов в пользу того, что стандартная модель описывает всю материю во Вселенной как результат интенсивного космологического рождения [48] массивных векторных бозонов из ва-

Рис. 3. Зависимость продольных N^{\parallel} и поперечных N^{\perp} компонент функции распределения векторных бозонов от безразмерного времени $\tau = \eta 2H_1$ и безразмерного импульса $x = q/M_1$ при значении начальных данных $M_1 = H_1$. Мы видим очень быстрое установление плотности в единицах первичного значения параметра Хаббла и доминирующий вклад релятивистских бозонов [31,32]. Значения начальных данных $M_1 = H_1$ следуют от соотношения неопределенности и дают температуру релятивистских бозонов $T \sim H_1 = (M_0^2 H_0)^{1/3} = 2,7$ К как сохраняющееся число космической эволюции, описывающей сверхновые [16, 17] и химическую эволюцию [8]



куума [25, 30–32] и это рождение обусловлено сингулярностью волновых функций векторных бозонов по массе [52].

Функции распределения плотности числа частиц по импульсу k для продольных $\mathcal{N}^{\parallel}(k, \eta)$ и поперечных $\mathcal{N}^{\perp}(k, \eta)$ векторных бозонов вычислены в работах [31,32]* при условии, когда масса векторных бозонов M_1 совпадает с параметром Хаббла H_1 , который задает скорость изменения логарифма этой массы. Результаты вычисления показаны на рис. 3 [32] для начальных данных $H_1 = M_1$. На нем отображены два факта: доминирующий вклад релятивистских продольных бозонов $k \geq M_1$ и быстрое «установление» плотности в единицах первичного значения параметра Хаббла. Это позволяет оценить температуру бозонов T , которая определяется процессами их рассеяния с сечением $\sigma \sim 1/M^2$.

Из зависимости числа релятивистских бозонов от температуры $n(T) \sim T^3$ и уравнения кинетической теории [56] для времени установления температуры

$$\eta_{\text{релакс}}^{-1} = n(T) \times \sigma \sim H$$

следует, что температура первичных бозонов определяется значениями их масс и параметра Хаббла:

$$T \sim (M_1^2 H_1)^{1/3} = (M_0^2 H_0)^{1/3} \sim 2,7 \text{ К}$$

*Эффект интенсивного рождения бозонов вычислялся операторным квантованием также в работах [52–55].

и является константой космической эволюции [25,30]. Вычисление дает значение температуры, очень близкое к наблюдаемой температуре реликтового излучения* $T_{\text{СМВ}} = 2,73 \text{ К}$.

Далее оказывается, что отношение плотности рожденной материи $\rho_v(\eta_I)$ к плотности движения первичного скалярного поля (квинтэссенции) $\rho_{\text{кр}}(\eta_I) = H_I^2 \varphi_I^2$ имеет экстремально малое значение:

$$\frac{\rho_v(\eta_I)}{\rho_{\text{кр}}(\eta_I)} \sim \frac{M_I^2}{\varphi_I^2} = \frac{M_W^2}{\varphi_0^2} \sim 10^{-34}. \quad (71)$$

Время же жизни бозонов определяется параметрами стандартной модели:

$$\eta_L = \frac{1}{2H_I} \left[\frac{\sin^2 \theta_W}{\alpha_{\text{КЭД}}} \right]^{2/3}, \quad (72)$$

где θ_W — угол Вайнберга; $\alpha_{\text{КЭД}} = 1/137$. Поперечные бозоны в течение их времени жизни формируют барионную асимметрию Вселенной как следствие «поляризации» этими бозонами вакуумного моря Дирака левых фермионов по правилам отбора стандартной модели [27], согласно которым разность числа барионов и лептонов сохраняется, а их сумма не сохраняется. Сверхслабое взаимодействие [58], ответственное за нарушение CP -симметрии с константой $X_{CP} \sim 10^{-9}$, замораживает барионную асимметрию Вселенной с плотностью

$$\rho_b(\eta = \eta_L) \simeq 10^{-9} \cdot 10^{-34} \rho_{\text{кр}}(\eta = \eta_L). \quad (73)$$

После распада бозонов их температура наследуется реликтовым излучением.

Вся последующая эволюция материи в постоянной холодной Вселенной повторяет известный сценарий горячей Вселенной [8], поскольку эта эволюция определена конформно-инвариантными отношениями масс и температуры m/T . Барионная плотность увеличивается как масса, а плотность первичной квинтэссенции уменьшается как обратный квадрат массы, поэтому современное значение барионной плотности, получаемое из (71), (72) и (73), равно

$$\Omega_b(\eta_0) = \left[\frac{\varphi_0}{\varphi_L} \right]^3 \cdot 10^{-43} \sim 10^{43} \left[\frac{\eta_I}{\eta_L} \right]^{3/2} \cdot 10^{-43} \sim \left[\frac{\alpha_{\text{КЭД}}}{\sin^2 \theta_W} \right] \sim 0,03, \quad (74)$$

и это дает хорошее согласие с данными наблюдений.

*Заметим, что флуктуации плотности космологически рожденных частиц в других моделях [57] уже связывают с первичными флуктуациями температуры реликтового излучения [20].

Таким образом, ОТО и стандартная модель, дополненные плотностью квинтэссенции в режиме жесткого состояния, и начальные данные $\varphi_1 = 10^4$ ГэВ, $H_1 = 2,7$ К описывают следующие события:

- $\eta = 0$: творение «пустой» Вселенной из «вакуума»;
- $\eta \sim 10^{-12}$ с: рождение векторных бозонов из «вакуума»;
- $10^{-12} < \eta < 10^{-11} \div 10^{-10}$ с: формирование барионной асимметрии;
- $\eta \sim 10^{-10}$ с: распад векторных бозонов;
- $10^{-10} < \eta < 10^{11}$ с: первичная химическая эволюция материи;
- $\eta \sim 10^{11}$ с: рекомбинация или отделение реликтового излучения;
- $\eta > 10^{17}$ с: земные эксперименты и эволюция сверхновых.

Принципиальное отличие такого описания от инфляционной модели [12] состоит в том, что начальным условием возникновения мира становится физический вакуум квантовой теории поля, определяемый как стабильное состояние с наименьшей энергией, а не ложный, как в инфляционной модели, и не загадочный «файербол» безмассовых частиц.

Рассуждения в терминах относительного эталона измерения ведут нас к Вселенной как физическому объекту с конечным объемом и конечным временем жизни*, результаты теоретического описания такой конечной Вселенной зависят от выбора системы отсчета и начальных данных. Таким образом, конформная симметрия как электродинамики, так и ОТО возвращает нас на исторический путь развития физики — путь систем отсчета, открытый Коперником, где все абсолюты теории задаются, в конце концов, ординарными начальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как пишет один из известных современных физиков Стивен Вайнберг в своей популярной книге «Первые три минуты» [8]: «Осциллирующая и стационарная модели привлекают некоторых космологов с философской точки зрения, потому что деликатно избегают проблемы Генезиса. Однако трудность первой состоит в том, что число фотонов к числу ядерных частиц (энтропия на ядерную частицу) увеличивается в каждом цикле благодаря определенному типу трения (объемная вязкость). Сейчас это отношение велико (10^9), но не бесконечно, поэтому число циклов до нас должно было быть конечным. Для стационарной модели проблемой является рост энтропии и выравнивание температур, и за бесконечное время Вселенная оказалась бы везде с одной температурой. Поэтому ни в одной такой модели мы не находим утешения, поскольку для человеческих существ почти неизбежна вера в то, что

*Это показывает нам и темное небо ночью, как мы уже обсуждали в разд. 2.

человеческая жизнь есть не просто более или менее нелепое завершение цепочки случайных событий, ведущих начало от первых минут взрыва, а была каким-то образом предопределена с самого начала. Вместе с тем Вселенная ошеломляюще враждебна нам, и ей предстоит будущее угасание в бескрайнем холоде (если она неограниченно расширяется) или в невыносимой жаре (если сжимается).

Но если и нет утешения в плодах таких исследований, есть, по крайней мере, какое-то утешение в самом исследовании. Люди не склонны убаюкивать себя сказками о богах и великанах или замыкаться мыслями на повседневных делах; они строят телескопы, спутники и ускорители и нескончаемые часы проводят за своими столами, осмысливая собранные данные. Попытка понять Вселенную — одна из немногих вещей, которые приподнимают человеческую жизнь над уровнем фарса и придают ей черты высокой трагедии».

По глубине мысли, обширности исследования и напряженности столкновения с официально принятыми религиозными взглядами первая физическая теория создавалась Ньютоном именно как «высокая трагедия» (см. [59]). Ньютон первый ввел в физику стандарты *непротиворечивого* математического доказательства в терминах четко сформулированных *абсолютных* понятий. Пытаясь проникнуть в тайну мироздания, Ньютон был убежден в «реальности» существования измеряемого мира в *абсолютном пространстве и времени*, он был уверен в его полной независимости от средств наблюдения и измерения, от свободы воли наблюдателя. В требовании Лапласа дать ему начальные данные для объяснения мира неявно содержится утверждение, что эти начальные данные существуют независимо от наблюдателя как еще не познанная истина, и убеждение в том, что рано или поздно эти данные будут известны и научная теория сможет все объяснить и предсказать с помощью открытых человеком законов природы.

Теории относительности и квантовая физика показали, что не существует абсолютного отделения измеряемого мира от средств измерения и наблюдения, свидетельством этого является вероятностный характер квантовых законов микромира и зависимость результатов измерения от системы отсчета наблюдателя.

По-видимому, эти свидетельства неклассической зависимости измеряемого реального мира от наблюдателя имел в виду Альберт Эйнштейн, когда писал Морису Соловину в своем письме от 1 января 1951 г. [60]: «Я не нашел лучшего выражения, нежели выражение «религиозное», для убеждения в *разумной природе реальности* и ее постижимости человеческим разумом. Там, где это убеждение отсутствует, там наука превращается в бездушный эмпиризм. Черт с ним, если попы наживут на этом капитал».

Теперь исследователи вплотную подошли к изучению проблем возникновения и развития Вселенной. Здесь перечислен целый ряд теоретических и наблюдательных аргументов, свидетельствующих, что колоссальная энер-

гетика космоса может успешно описываться точно так же, как и поведение релятивистского квантового «микромира», вероятностные законы которого объясняются невозможностью его полного отделения от «макроприборов» *внешнего наблюдателя*. Мы видели, что теория квантовой микрочастицы, перенесенная на теорию всей Вселенной в целом, дает возможность решения проблем энергии, времени, начальных данных, квантования для Вселенной в полной аналогии с решением подобных проблем для динамики частицы. Описание огромной макроскопической Вселенной использует законы и методы, открытые в квантовой теории «микромира», поэтому Вселенная стала играть роль квантового объекта без всякого «макроприбора» и его Неизвестного Владельца.

Современный исследователь начинает убеждаться в зависимости всех измеряемых физических процессов от динамики Вселенной и от начальных данных рождения Вселенной, точно так же как в совсем недавнем прошлом он убеждался в невозможности полного отделения измеряемых физических процессов от средств измерения наблюдателя, который осуществлял эти процессы в виде эксперимента. Кто же проделал этот эксперимент рождения Вселенной? Кто определил начальные данные этого рождения? Чьей записной книжкой является волновая функция Вселенной? Может быть, кто-нибудь найдет ответы на эти вопросы и поймет смысл «*высокой трагедии*».

Авторы благодарны Д. Блашке, А. В. Ефремову, Ю. Лукерскому, А. И. Осипову, П. Флину, М. Хеллеру и Н. А. Черникову за плодотворные дискуссии, а также А. А. Гусеву и Н. С. Царенковой за техническую помощь в подготовке работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Friedmann A. A.* // *Z. Phys.* 1922. V. 10. P. 377; 1924. V. 21. P. 306;
Фридман А. А. Мир как пространство и время. М.: Наука, 1965.
2. *Hawking S. W., Ellis G. F. R.* *The Large Scale Structure of Space-Time.* Cambridge University Press, 1973.
3. *Гинзбург В. Л.* Как устроена Вселенная и как она развивается во времени. М.: Знание, 1968.
4. *Regge T.* *An Elementary Course on General Relativity* // *Series Acad. Training, Lectures.* CERN-83-09. 1983.
5. *Weinberg S.* *Gravitation and Cosmology. Principles and Applications of the General Theory of Relativity.* N. Y.: Basic Books, Inc., Publishers, 1971.
6. *Hoyle F., Narlikar J. V.* // *Proc. Roy. Soc. A.* 1964. V. 277; V. 282;
Хойл Ф. Галактики, ядра и квазары. М.: Мир, 1968.
7. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М.: Наука, 1967;
Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Теоретическая физика. Т. IX. Статистическая физика. Ч. 2. Теория конденсированного состояния. М.: Физматлит, 2000.
8. *Weinberg S.* *First Three Minutes. A modern View of the Origin of the Universe.* N. Y.: Basic Books, Inc., Publishers, 1977.

9. *Zakharov A. F.* Microlens Could Bring Dark Mater into Focus // Phys. Newslett. 2000. V. 3. P. 1.
10. *Чернин А. Д.* // УФН. 2001. Т. 171. С. 11.
11. *Gatow G.* // Phys. Rev. 1946. V. 70. P. 572; 1948. V. 74. P. 505.
12. *Линде А. Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М.: Наука, 1990.
13. *Gut A. G., Steinhardt P. J.* // Sci. American. 1984. V. 250. P. 90;
Гут А. Г., Стейнхардт П. Дж. Раздувающаяся Вселенная // В мире науки. 1984. № 7.
14. *Герштейн С. С. и др.* Масса гравитона, квинтэссенция и осциллирующий характер эволюции Вселенной. Препринт ИФВЭ 2003-13. Протвино, 2003; направлено в «ЯФ».
15. *Hubble E.* The Realm of the Nebulae. New Haven: Yale University Press, 1936; N. Y.: Dover Publications, Inc., 1969.
16. *Riess A. G. et al.* // Astron. J. 1998. V. 116. P. 1009;
Perlmutter S. et al. // Astrophys. J. 1999. V. 517. P. 565.
17. *Riess A. G. et al.* // Astrophys. J. 2001. V. 560. P. 49; astro-ph/0104455.
18. *Zlatev I., Wang L., Steinhardt P. J.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 896;
Wetterich C. // Nucl. Phys. B. 1988. V. 302. P. 668.
19. *Fukugita M., Hogan C. J., Peebles P. J. E.* // Astrophys. J. 1998. V. 503. P. 518.
20. *Bond J. R. et al. (MaxiBoom collab.).* CMB Analysis of Boomerang & Maxima & the Cosmic Parameters $\Omega_{\text{tot}}, \Omega_b h^2, \Omega_{\text{cdm}} h^2, \Omega_\Lambda, n_s$ // Proc. of IAU Symp. 201 (PASP); CITA-2000-65. 2000; astro-ph/0011378.
21. *Halley E.* // Phil. Trans. 1720. V. 31. P. 24;
de Chéseaux J. P. Traité de la comète qui a paru en Decembre 1793 et en Janvier, Fevrier et Mars 1794, Lussanne et Genevie. Michel Bouquet et Compagnie, 1794;
Olbers W. // Dode Ib. 1826. V. 15. P. 24.
22. *Harrison E. E.* Cosmology. Cambridge University Press, 1995.
23. *Einstein A.* // Sitzungsber. d. Berl. Akad. 1917. V. 1. P. 147;
Эйнштейн А. Собр. науч. тр. М., 1965. Т. 1. С. 601.
24. *Narlikar J. V.* // Space Sci. Rev. 1989. V. 50. P. 523;
Хойл Ф. Галактики, ядра и квазары. М.: Мир, 1968.
25. *Behnke D. et al.* // Phys. Lett. B. 2002. V. 530. P. 20; gr-qc/0102039.
26. *Сахаров А. Д.* // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5. С. 24.
27. *Рубаков В. А., Шапошников М. Е.* // УФН. 1996. Т. 166. С. 493.
28. *Максвелл Дж. Кл.* Трактат об электричестве и магнетизме. М., 1989. Т. 1. С. 10.
29. *Pawlowski M. et al.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 444. P. 293.
30. *Blaschke D. et al.* // Proc. of the XVIII IAP Colloquium «On the Nature of Dark Energy», Paris, July 1–5, 2002; Report-no: MPG-VT-UR 240/03; astro-ph/0302001.
31. *Pervushin V. N., Proskurin D. V., Gusev A. A.* // Gravitation & Cosmology. 2002. V. 8. P. 181.
32. *Блашке Д. и др.* Космологическое рождение векторных бозонов и микроволновое фоновое излучение // ЯФ. 2004 (в печати); gr-qc/0103114; hep-th/0206246;
Pervushin V. N., Proskurin D. V. // Gravitation & Cosmology. 2002. V. 8. P. 161; gr-qc/0106006.
33. *Pervushin V. N.* Astrophysical Data and Conformal Unified Theory. hep-ph/0211002.
34. *Barbashov B. M. et al.* Astrophysics in Relative Units as Conformal Unified Theory without Planck Absolutes. JINR Preprint E2-2002-295. Dubna, 2002; submitted to «Theor. Math. Phys.».

35. *Pervushin V. N.* // Riv. Nuovo Cim. 1985. V. 8. P. 1.
36. *Bateman H.* // Proc. London Math. Soc. 1909. V. 7. P. 70;
Cunningham E. // Ibid. V. 8. P. 77.
37. *Weyl H.* // Proc. Amer. Phil. Soc. 1949. V. 93. P. 535.
38. *Penrose R.* Relativity, Groups and Topology. London: Gordon and Breach, 1964;
Chernikov N., Tagirov E. // Ann. Inst. Henri Poincaré. 1968. V. 9. P. 109.
39. *Барбашов Б. М., Первушин В. Н., Проскурин Д. В.* // ТМФ. 2002. Т. 132. С. 181.
40. *Боголюбов Н. Н. и др.* Общие принципы квантовой теории поля. М.: Наука, 1987.
41. *Pawlowski M., Pervushin V. N.* // Intern. J. Mod. Phys. 2001. V. 16. P. 1715; hep-th/0006116;
Pervushin V. N., Proskurin D. V. // Gravitation & Cosmology. 2001. V. 7. P. 89.
42. *Levi-Civita T.* // Prace Mat.-Fiz. 1906. V. 17. P. 1;
Shamugadhasan S. // J. Math. Phys. 1973. V. 14. P. 677;
Gogilidze S. A., Khvedelidze A. M., Pervushin V. N. // J. Math. Phys. 1996. V. 37. P. 1760; Phys. Rev. D. 1996. V. 53. P. 2160; Phys. Part. Nucl. 1999. V. 30. P. 66.
43. *De Witt B. S.* // Phys. Rev. 1967. V. 160. P. 1113.
44. *Misner C.* // Phys. Rev. 1969. V. 186. P. 1319.
45. *Bogoliubov N. N.* // J. Phys. USSR. 1947. V. 2. P. 23.
46. *Pervushin V. N., Smirichinski V. I.* // J. Phys. A: Math. Gen. 1999. V. 32. P. 6191.
47. *Srianand R., Petitjean P., Ledoux C.* // Nature. 2000. V. 408. P. 931.
48. *Тагиров Э. А., Черников Н. А.* Препринт ОИЯИ P2-3777. Дубна, 1968;
Бронников К. А., Тагиров Э. А. Препринт ОИЯИ P2-4151. Дубна, 1968;
Parker G. L. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 21. P. 562; Phys. Rev. 1969. V. 183. P. 1057; Phys. Rev. D. 1971. V. 3. P. 346.
49. *Гриб А. А., Мамаев С. Г., Мостепененко В. М.* Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях. М.: Атомиздат, 1988.
50. *Starobinsky A. A.* // Phys. Lett. B. 1980. V. 91. P. 99.
51. *Kofman L. A., Linde A. D., Starobinsky A. A.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 3195; Phys. Rev. D. 1997. V. 56. P. 3258.
52. *Pavel H.-P., Pervushin V. N.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 1999. V. 14. P. 2285.
53. *Schwinger J.* // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 324.
54. *Полубаринов И. В.* // ЭЧАЯ. 2003. Т. 34, вып. 3. С. 738.
55. *Nguyen Tuan Han, Pervushin V. N.* // Mod. Phys. Lett. A. 1987. V. 2. P. 367;
Pervushin V. N. // Phys. Part. Nucl. 2003. V. 34 (in print); hep-th/ 0109218.
56. *Bernstein J.* Kinetic Theory in the Expanding Universe. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
57. *Martin J., Brandenberger R. J.* hep-th/0005209;
Brandenberger R. J., Martin J. astro-ph/0005432;
Niemeyer J. C. // Phys. Rev. D. 2001. V. 63. P. 12352.
58. *Окунь Л. Б.* Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
59. *Дмитриев И. С.* // Вопросы философии. 1991. Т. 6. С. 58.
60. *Эйнштейн А.* // Эйнштейновский сб. М., 1967. С. 23.