

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983/8

Л. С. Марочник,
П. Д. Насельский

ВСЕЛЕННАЯ :
ВЧЕРА, СЕГОДНЯ,
ЗАВТРА



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

**КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**

8/1983

Издается ежемесячно с 1971 г.

Л. С. Марочник,

профессор, доктор физико-математических наук

П. Д. Насельский,

кандидат физико-математических наук

**ВСЕЛЕННАЯ:
ВЧЕРА,
СЕГОДНЯ,
ЗАВТРА**

в приложении этого номера:

ЖЕЛАЮЩИМ ЗНАТЬ БОЛЬШЕ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Вселенная по Ньютону и Вселенная по Эйнштейну	10
Эволюционирующая Вселенная	14
Микроволновый фон и прошлое Вселенной	21
Сценарий Большого взрыва	28
Образование крупномасштабной структуры	38
Массивные нейтрино и первичные черные дыры	42
На пути к «Великому объединению»	48
Заключение	52
Рекомендуемая литература	54
ЖЕЛАЮЩИМ ЗНАТЬ БОЛЬШЕ	
<i>А. Л. Зельманов. Модель Фридмана и ее альтернативы</i>	55

Марочник Л. С., Насельский П. Д.

М 30 Вселенная: вчера, сегодня, завтра. — М.: Знание, 1983. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 8).
11 к.

В брошюре приводятся современные представления о самой ранней стадии расширения Вселенной, многие из которых сложились лишь в последние годы в связи с прогрессом физики частиц. Показано, что углубление наших знаний о первых этапах расширения Вселенной позволяет сделать более конкретные выводы и о ее предстоящей эволюции.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами астрофизики и естествознания.

3607000000

ББК 39.6
6Т6

ВВЕДЕНИЕ

В своей замечательной книге «Вселенная, жизнь, разум» (М., Наука, 1980) советский астрофизик И. С. Шкловский пишет: «Если бы астрономы-профессионалы постоянно и ощутимо представляли себе чудовищную величину космических расстояний и интервалов времени эволюции небесных светил, вряд ли они могли успешно развивать науку, которой посвятили свою жизнь». Это безусловно верно, так как самая фантастическая научная фантастика бледнеет перед «правдой жизни». Современные научные представления о пространстве и времени, прошлом и будущем Вселенной, свойствах пространства и времени, материи поражают человеческое воображение. Все это — «вечные проблемы» науки. Им посвящена эта небольшая брошюра.

Вопрос о том, что такое Вселенная, волновал человечество всегда, вероятно, уже тогда, когда человек как биологический вид превратился в *homo sapiens*. Войны, лишения, холод и голод, сопутствующие человечеству на всем протяжении его истории, как ни странно, не отвратили его от жгучего желания получить ответы на столь абстрактные, казалось бы, вопросы, не связанные с борьбой за существование и стремлением к жизненному комфорту: что такое материя, что лежит в основе мироздания, было ли начало и будет ли конец нашего мира? Пожалуй, вся история естествознания прошла под флагом поиска ответов на эти вопросы.

В современной науке подобные «вечные проблемы» принадлежат компетенции физики и астрофизики, и эта брошюра является попыткой рассказать по возможности «попросту» о том, что здесь сейчас ясно и что нет. Прежде всего отметим, что «вечные проблемы» — это фундаментальнейшие проблемы современной физики, астрофизики и вообще естествознания. Почему?

Для ответа на этот вопрос придется несколько отвлечься от темы, чтобы ответить на другой: какие вообще проблемы в современной науке и, в частности, в физике и астрофизике следует считать фундаментальными?

Нам импонирует точка зрения советского физика В. Л. Гинзбурга, изложенная в его книге «О физике и астрофизике» (М., Наука, 1974). Физика изобилует важными и нерешенными проблемами в самых различных своих областях. Однако все они могут быть разбиты — зачастую достаточно условно, ибо «все грани условны и подвижны» (Гераклит) — на две далеко «неравные половины». К первой из них, большей, можно отнести проблемы, трудности решения которых являются, образно говоря, «техническими», связанными, например, с математической сложностью задачи или ограниченными возможностями тонких экспериментов, обусловленными, скажем, недостаточным уровнем развития современной техники. Во всех этих случаях мы знаем законы природы, управляющие явлениями, — вопрос лишь в преодолении математических или технологических сложностей. Если бы существовал «идеальный ум» Лапласа, способный разрешить неограниченное количество дифференциальных уравнений (законы природы описываются математически, как правило, дифференциальными уравнениями), то нерешенных проблем теоретической физики (например, из тех, что следует отнести к большей из «неравных половин»), просто бы не осталось.

Другого рода проблемы (отнесенные к «меньшей из половин») возникают на границе, образно говоря, нашего знания и незнания. Благодаря гигантским ускорителям элементарных частиц сейчас известны законы микромира, действующие вплоть до пространственных масштабов $l_0 \leq 10^{-16}$ см (классический радиус электрона для сравнения равен $r_e \approx 1,8 \cdot 10^{-13}$ см). Сегодня мы довольно много знаем о «неэлементарности» элементарных частиц, знаем законы квантовой механики и квантовой теории физических полей, определяющие структуру материи вплоть до столь малых масштабов. Однако что происходит в масштабах, меньших чем l_0 , неизвестно, и не потому, что мы здесь сталкиваемся с математическими сложностями, — мы просто не знаем законов природы, управляющих материей при $l \ll l_0$.

По существу, речь идет о структуре элементарных

частиц и законах их взаимодействия друг с другом. Прогресс в этой области физики связан с чрезвычайно дорогостоящим строительством все более и более гигантских ускорителей, а так как затраты растут не пропорционально увеличивающейся мощности таких машин, а гораздо быстрее, то процесс проникновения в глубины микромира идет медленно и трудно. Проблемы, аналогичные проблеме структуры элементарных частиц, связанные с нашим незнанием неоткрытых пока законов природы, определяющих данное явление, можно назвать фундаментальными. В коротком ряду фундаментальных проблем современной физики, перечисленных В. Л. Гинзбургом, «вечные проблемы» занимают почетное место.

Специфика вопросов, затрагивающих основы мироздания в том, что здесь мы имеем дело с экстремальными ситуациями: продвигаясь в процессе познания к пониманию свойств материи во все более малых масштабах, мы неизбежно выходим на рубежи, где современный уровень развития технологии ставит ограничения экспериментальным возможностям, — возникает ситуация, когда проникнуть в микромир еще глубже уже невозможно. Законы природы, действующие на следующем субуровне микромира, неизвестны: зная структуру материи в масштабах $l > l_0$, мы уже не знаем ее в масштабах $l < l_0$.

В астрофизике экстремальные ситуации возникают при попытках понять природу процессов, разыгрывающихся, например, в аномально сильных гравитационных полях, выяснить, действительно ли существуют в природе открытые «на кончике пера» теоретиков особые области пространства-времени — черные дыры и т. п.

С экстремальной ситуацией, аналогичной той, что возникает в микромире, мы сталкиваемся при попытке понять картину мира крайне далекого прошлого. Здесь, как и в микромире, экспериментальные, или, лучше сказать, наблюдательные, возможности также ограничены уровнем современной технологии, так что, зная законы природы, действующие в не очень далеком прошлом, скажем, при $t > t_*$ (об этой величине t_* подробнее будет сказано позже), мы уже не знаем их при $t < t_*$. Можно пытаться экстраполировать известные законы физики и в далекое прошлое Вселенной, т. е. в область времен $t < t_*$. Однако за подобную экстраполяцию придется дорого платить — противоречия, возникающие при этом

в нашем понимании структуры пространства и времени, глобальны, и ситуация ничуть не лучше, чем в микромире, когда речь идет, например, о понимании структуры элементарных частиц. Оказывается, такая экстраполяция приводит к выводу о существовании в прошлом сингулярного состояния, когда все вещество было сжато в точку, а его плотность бесконечна.

О чем это говорит? Уместо привести грубую, но «прозрачную» аналогию с колебаниями маятника. Если решать хорошо известную в механике задачу о малых колебаниях маятника под действием периодической вынуждающей силы, то окажется, что при совпадении собственной частоты с частотой вынуждающей силы амплитуда колебаний оказывается бесконечной. Это является следствием ряда идеализаций. В частности, не учитывалось трение в подвесе маятника, которое всегда существует. Если же учесть и это обстоятельство, то амплитуда колебаний будет конечной величиной, так как часть работы вынуждающей силы расходуется на преодоление силы трения. Бесконечная плотность Вселенной в сингулярном состоянии также, по-видимому, является следствием каких-либо неучтенных обстоятельств. Но каких? Это — вопрос, к которому мы неоднократно будем возвращаться.

Итак, продвигаясь в глубь микромира, мы доходим до границы, где «кончается асфальт» — наше знание законов природы. Аналогичная ситуация возникает при попытке продвинуться в глубины прошлого Вселенной. Вопрос о структуре мира в крайне малых масштабах и в крайне далеком прошлом составляет содержание фундаментальнейших проблем современного естествознания. Самое удивительное, однако, заключается в том, что эти проблемы, расположенные, казалось бы, в полярных областях науки — физике микромира и астрофизике, оказываются тесно взаимосвязанными: проблема структуры пространства и времени не может быть, оказывается, решена без знания структуры элементарных частиц и вообще законов природы, действующих в микромире. Впрочем, вполне вероятно также и обратное.

Эта брошюра посвящена одной из «вечных проблем» — так называемой космологической проблеме прошлого и будущего Вселенной. Привычная для физиков постановка вопроса заключается в том, чтобы,

зная начальные условия, определить законы дальнейшей эволюции исследуемого объекта. В космологии ситуация обратная — космологи стараются определить «начальные условия» для Вселенной по реализованному природой решению (точнее, его части) — структуре Метагалактики, т. е. части Вселенной, доступной сегодняшним наблюдениям. Как мы увидим, современные физика и астрофизика пока не могут однозначно ответить на этот вопрос — возможны различные варианты эволюции, приводящие в конечном итоге к наблюдаемым сегодня следствиям.

Прежде всего, почему мы употребляем строгий математический термин «начальные условия» в кавычках? Вселенная должна была бы существовать вечно, и именно поэтому абсурдным кажется словосочетание «начальные условия» Вселенной. Основываясь на этом, кажущемся естественным с точки зрения здравого смысла представлении о вечности Вселенной¹, мы ставим кавычки, употребляя строгое математическое понятие «начальные условия».

Нужно, конечно, ясно понимать, что, вообще говоря, так называемый здравый смысл — не всегда хороший советчик, когда речь идет о естественнонаучных проблемах мироздания. Достаточно вспомнить, как именно, отказавшись от привычных с точки зрения здравого смысла представлений об абсолютности пространства и времени, Эйнштейн установил относительность этих понятий, показав, что в разных системах отсчета время течет по-разному, — вещь невероятная с позиций обыденного здравого смысла. Если, однако, к интуитивному неприятию возможности «начала мира» добавить и то, что в этом «начальном состоянии» возникает «патология» с бесконечной плотностью материи, то становится ясно, что нет оснований говорить о «начале» в буквальном смысле слова (без кавычек).

С чем связано такое противоестественное поведение плотности?

Можно, очевидно, предложить несколько возможных гипотез. Во-первых, мы, вероятно, чего-то не учитываем

¹ Разумеется, с позиций философии диалектического материализма здесь нет проблем: Вселенная существует вечно. В тексте же речь идет, конечно, о подходе к вопросу с точки зрения естественных наук — физики и астрофизики. Здесь и далее это следует иметь в виду.

в рамках современной теории пространства-времени, т. е. общей теории относительности (ОТО), либо сама ОТО здесь несправедлива и ее следует заменить другой теорией, соответствующей тем неизвестным пока законам природы, которые имеют место вблизи «начала». Во-вторых, не исключено также и другое. Эффект расширения установлен лишь для наблюдаемой части Вселенной — Метагалактики. Возможно, незаконным является перенесение наблюдаемых свойств Метагалактики на всю Вселенную. В физике и астрофизике такая экстраполяция производится потому, что ОТО, привлекаемая для описания расширения Вселенной в целом, удивительно хорошо описывает и расширение наблюдаемой ее части — Метагалактики. Поэтому, следуя научной литературе, и мы в этой брошюре говорим об эволюции Вселенной, а не только Метагалактики².

В этих двух направлениях, собственно, и развивается современный научный поиск. Особенно во втором, поскольку заведомо ясно, что если расширение Метагалактики действительно шло в соответствии с предсказаниями ОТО, то в далеком прошлом Вселенная находилась в состоянии, которое следует описывать законами квантовой физики (плотность материи когда-то должна была превышать ядерную), в то время как ОТО — теория классическая (в нее не входит квантовая постоянная Планка h). Поэтому основное внимание сейчас уделяется улучшению теории элементарных частиц — углублению понимания законов микромира, так как для решения этой космологической проблемы необходимо, как упоминалось, знать структуру материи в сверхплотном и сверхгорячем состоянии, в котором находилось вещество Вселенной 15—20 млрд. лет назад. Так происходит смыкание полярных областей науки — космологии, изучающей Мегамир, с физикой элементарных частиц, пытающейся сегодня установить их «неэлементарные» свойства. Впрочем, об этом уже говорилось, а подробнее будет сказано дальше.

Здесь, во введении, мы легко оперировали понятиями «прошлое Вселенной», «ее будущее», т. е. неявно предполагали знакомство читателя с представлениями

² Вместе с тем сделанные здесь замечания следует помнить при чтении брошюры, особенно в тех случаях, когда речь идет о ситуациях, когда «не сходятся концы с концами».

о том, что Вселенная эволюционирует. В действительности, проникновение идей эволюционности Вселенной в естествознание радикально изменило его облик. Это произошло, с одной стороны, вследствие отказа от привычных представлений ньютоновой физики, с другой — вследствие накопления наблюдательных данных о далеких объектах Вселенной (из которых следовало, что она эволюционирует).

Эволюции понятия «эволюция» (применительно ко Вселенной) мы и посвящаем следующие два коротких раздела.

Опытные данные, на которых основывается сегодняшнее знание о ранней Метагалактике, это — данные по реликтовым следам, дошедшим до нас от бурных процессов прошлого. Пока их всего два: фоновое электромагнитное излучение и распространенность легких химических элементов, «сваренных» в термоядерном котле ранней горячей Метагалактики. Поэтому этим, единственным пока «экспериментальным данным» о ранней Метагалактике мы уделяем особое внимание. Мы рассмотрим затем сценарий Большого взрыва — рабочую гипотезу, которая позволяет непротиворечивым образом как будто объяснить последовательные этапы эволюции Вселенной, начиная с эпохи термоядерного синтеза химических элементов — миллионных долей секунды, протекших после начала расширения, и до наших дней, а также возможные эволюционные треки, по которым Вселенная могла развиваться до начала термоядерного синтеза.

Особое внимание будет уделено последним достижениям теории элементарных частиц, точнее, ее следствиям, существенным для космологической проблемы. Мы обязательно обсудим те возможные изменения в современных воззрениях о характере эволюции Вселенной, к которым могут привести «модные идеи» последних лет (о ненулевой массе покоя нейтрино, о роли первичных черных дыр и т. п.).

Этой фундаментальнейшей проблеме современной физики и астрофизики посвящено немало специальных монографий и популярных книг в СССР и за рубежом. Конечно, столь небольшая брошюра может служить не более чем введением в такую сложную и увлекательную область науки. Читателю, желающему познакомиться подробнее с космологической проблемой, мы бы реко-

мендовали прекрасные популярные книги И. Д. Новикова «Эволюция Вселенной» (М., Наука, 1983) и С. Вайнберга «Первые три минуты» (М., Мир, 1981).

ВСЕЛЕННАЯ ПО НЬЮТОНУ И ВСЕЛЕННАЯ ПО ЭЙНШТЕЙНУ

Роман Ф. М. Достоевского «Братья Карамазовы» был закончен в 1880 г. Иван Карамазов говорит своему брату Алеше: «...если бог есть и если он действительно создал землю, то, как нам совершенно известно, создал он ее по эвклидовой геометрии, а ум человеческий с понятием лишь о трех измерениях пространства. Между тем находились и находятся даже и теперь геометры и философы и даже из замечательнейших, которые сомневаются в том, чтобы вся вселенная или, еще обширнее — все бытие было создано лишь по эвклидовой геометрии, осмеливаются даже мечтать, что две параллельные линии, которые по Эвклиду ни за что не могут сойтись на земле, может быть, и сошлись бы где-нибудь в бесконечности... Я смиренно сознаюсь, что у меня нет никаких способностей разрешать такие вопросы, у меня ум эвклидовский, земной... Все это вопросы, совершенно несвойственные уму, созданному с понятием лишь о трех измерениях... Пусть даже параллельные линии сойдутся, и я это сам увижу: увижу и скажу, что сошлись, а все-таки не приму»³.

Монолог Ивана Карамазова как нельзя более годится эпиграфом к этому разделу. Мы решили обойтись без эпиграфов, но, не удержавшись от искушения, привели этот текст здесь лишь потому, что лучше Достоевского, написавшего его более ста лет назад, не скажешь о психологической окраске той драмы идей, которая сопутствовала отходу от ньютоновых представлений о пространстве и времени.

В школе мы проходим законы Ньютона, которые он открыл в XVIII в., в том числе и закон всемирного тяготения. В соответствии с этим законом любые материальные тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Все четыре закона Ньютона прекрасно подтверждались на опыте, и их, казалось, было вполне достаточно; что-

³ Достоевский Ф. М. Братья Карамазовы. Т. 1. М., ГИХЛ, 1958, с. 312—313.

бы понять устройство Вселенной. В ньютоновой космологии считается, что пространство, в котором мы живем, и время абсолютны: пространство может быть уподоблено, образно говоря, некоторому существующему вечно, неограниченно большому неподвижному «ящику» — вместительности материи; законы движения материи определяются всемирным тяготением, время текло и течет непрерывно, позволяя сравнивать между собой (и относительно «ящика») различные положения небесных тел в процессе их гравитационного взаимодействия и движения.

В этой прекрасной своей ясностью картине мира были, правда, небольшие детали, портившие впечатление. Например, так называемый гравитационный парадокс: коль скоро пространство неограничено и масса помещенной в него материи неограниченно велика, то, согласно закону всемирного тяготения, все тела должны двигаться с неограниченно большими ускорениями, чего, однако, не наблюдалось и не наблюдается. Тем не менее подобные нюансы не могли поставить под сомнение главное — правильность столь очевидных и простых представлений.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн опубликовал статью «К электродинамике движущихся сред». Это была знаменитая теория относительности, точнее, так называемая специальная теория относительности (СТО), перевернувшая наши представления о законах течения времени. Объяснив ряд неясных в то время опытов со светом, СТО с неизбежностью подводила к выводу об относительности времени. Выяснилось, что часы, движущиеся по инерции (т. е. равномерно и прямолинейно) друг относительно друга, по-разному отсчитывают время: время течет тем медленнее, чем быстрее движутся часы. Оказалось, что, несмотря на относительность течения времени, причины все же не могут опережать следствия, если тела движутся с субсветовой скоростью. Это могло бы произойти, если бы было возможно движение материальных тел со сверхсветовой скоростью, но это запрещала СТО⁴. Тем не менее возникающие в СТО всевозможные парадоксы, связанные со временем, интриговали воображение. Как остроумно заметил по этому поводу один английский поэт:

⁴ Мы не касаемся здесь вопроса о тахионах — гипотетических частицах, движущихся со сверхсветовыми скоростями.

Сегодня в полдень пущена ракета.
Она летит куда быстрее света.
И долетит до цели в шесть утра
Вчера.

(Перевод С. Маршака)

Одиннадцать лет понадобилось Эйнштейну для того, чтобы создать общую теорию относительности (ОТО), которая установила свойства времени в общем случае. При этом оказалось, что само трехмерное пространство, в котором мы живем, в действительности оказывается криволинейным, а не плоским, как всегда подсказывал пресловутый здравый смысл (вспомним Ивана Карамзова), и кратчайшее расстояние между двумя точками в нашем пространстве, вообще говоря, — не прямая, а некоторая кривая линия (например, на сфере кратчайшие расстояния проходят по дугам больших кругов).

Более того, согласно ОТО геометрия пространства не является «застывшей», не меняющейся со временем, как это было у Ньютона. И она и течение времени зависят от движения и распределения материи в пространстве. В свою очередь, распределение и движение материи зависят от геометрии пространства, так что материя, пространство и время неразрывно связаны и нельзя, как это было у Ньютона, рассматривать отдельно пространство-«ящик», в который помещена материя, движущаяся и располагающаяся в нем независимо от свойств «ящика», и время, которое течет одинаково в каждой точке этого пространства. Пространство и время оказались неразделимы. Поэтому в ОТО вообще говорят о кривизне четырехмерного (а не трехмерного) пространства, в котором одним из измерений является время.

Эпитафия на могиле Исаака Ньютона была написана английским поэтом XVIII в. Александром Попом, которую после появления ОТО дополнил эпитаграммой Дж. Сквайр. Вместе они выглядели так:

Nature and Nature's laws lay hid in night:
God said: Let Newton be! and all was light.

(Alexander Pope)

It did not last: the Devil, howling Ho!
Let Einstein be! restored the status quo.

(J. C. Squire)

Или в переводе С. Маршака:

Был этот мир глубокой тьмой окутан
Да будет свет! И вот явился Ньютон.
Но сатана недолго ждал реванша —

Пришел Эйнштейн и стало все, как раньше!

Представить себе нечто более несуслазное с точки зрения обыденного опыта, чем криволинейность нашего пространства и, более того, изменяемость его геометрии со временем, было трудно, почти невозможно, тем более что подобные экзотические представления шли на смену таким подкупающе простым ньютоновым.

Как совместить представление о криволинейности пространства с известным из повседневного опыта фактом, что кратчайшее расстояние между телами в пространстве есть все-таки прямая линия? Ответ заключается в том, что наш здравый смысл основан на повседневном опыте (и в быту, и в физической лаборатории), который всегда имел дело с относительно небольшими расстояниями. На самом же деле даже расстояния до самых далеких звезд нашей Галактики (не говоря уже о расстояниях между какими-либо точками на поверхности Земли) все еще малы для того, чтобы наглядно могла проявиться кривизна пространства. Существенным образом она начинает сказываться на расстояниях, превышающих десятки мегапарсек. Укажем для примера, что диаметр диска нашей собственной Галактики — Млечного пути — порядка 30 кпс, т. е. в тысячи раз меньше.

Следовательно, вопрос о структуре и эволюции Вселенной должен был решаться не на основе закона всемирного тяготения, который по Ньютону определял распределение материи в пространстве, а на основе законов ОТО, описывающихся сложнейшими дифференциальными уравнениями Эйнштейна. Решив эти уравнения, можно было бы в принципе определить геометрическую структуру пространства, распределение в нем материи, изменение того и другого с течением времени, а также характер течения времени в разных областях пространства.

После того как человечество отказалось от антропоцентрических воззрений, когда стало ясно, что Земля и даже Солнечная система не являются чем-то выделенным в «безмерном» пространстве Вселенной, естественно было бы считать, что и все направления в пространстве равноправны — выделенных направлений нет. Пространства, обладающие такими свойствами, называют изотропными. Конечно, изотропия пространства, так же как и его однородность, должна проявляться лишь в очень больших масштабах, намного превышающих раз-

меры одних из самых крупных из известных в настоящее время структурных единиц Вселенной — скоплений и сверхскоплений галактик. Естественно, что эти свойства Вселенной — ее однородность и изотропия в больших масштабах — должны были найти свое отражение в рамках ОТО, описывающей геометрические характеристики пространства-времени.

В 1924 г. советский математик А. А. Фридман опубликовал результаты исследований возможного поведения моделей однородной и изотропной Вселенной в рамках ОТО. Полученные им результаты оказались поразительными — Вселенная с течением времени должна либо неограниченно расширяться, либо сжиматься, либо пульсировать. Эти предсказания противоречили существовавшим в то время (ньютоновым) представлениям о глобальных свойствах пространства и времени, представлениям о стационарности Вселенной, неизменности ее облика со временем. Но от математических прогнозов до реальной ситуации колоссальная дистанция, и вполне понятно, что отказ от традиционных представлений о стационарной картине мира, помимо математических аргументов, должен был прежде всего базироваться на достоверных наблюдательных данных.

Нам придется сделать еще небольшое отступление от основной темы брошюры и буквально в нескольких словах остановиться на истории вопроса — как экспериментально был открыт факт нестационарности нашего мира.

ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Нам придется мысленно перенестись примерно на 70 лет назад, в лабораторию Лоуэллской обсерватории, где Весто Мелвин Слайфер исследовал спектральные линии поглощения около 40 спиральных галактик. Повидимому, первым, кто внедрил методы оптической спектроскопии в астрономию, был мюнхенский оптик Иозеф Фраунгофер, отождествивший в 1814 г. спектральные линии химических элементов в спектре излучения Солнца. Оказалось, что по мере поглощения излучения, идущего от внутренних слоев, в солнечной атмосфере его спектр претерпевает ряд изменений, связанных с присутствием на Солнце таких типично земных элементов, как кальций, железо, хром и т. д. Таким об-

разом, загадочная звездная субстанция, о которой мы находим упоминание еще в трудах Аристотеля, является не чем иным, как атомами и молекулами обычных химических элементов.

Когда стала ясна природа излучения звезд, возникла идея использовать оптические спектры для изучения внутреннего строения и характера движения звезд в пространстве. Последняя возможность связана с эффектом, открытым в 1842 г. пражским математиком Иоганном Доплером. Суть его заключается в том, что при удалении или приближении источника электромагнитных или звуковых волн к приемнику увеличивается или уменьшается длина волны принимаемого излучения — как принято говорить, происходит смещение спектральных линий (в красную или голубую области). Регистрируя это смещение, можно определить скорость, с которой происходит перемещение источника в пространстве, что, собственно, и используется при измерениях скоростей движения звезд.

Звезды распределены в пространстве крайне неравномерно — они группируются в галактики, насчитывающие примерно 10^9 — 10^{14} звезд (наша Галактика, например, содержит около $2 \cdot 10^{11}$ звезд). Из галактик выходит электромагнитное излучение (в частности, излучение звезд), и именно его исследовал в 1910—1922 гг. Слайфер. Он получил удивительные результаты — практически у всех исследуемых им объектов было обнаружено сравнительно небольшое смещение спектральных линий поглощения химических элементов — либо в красную, либо в голубую области спектра, но в основном в красную. Эти данные свидетельствовали о наличии относительного движения галактик.

Но является ли оно хаотическим или в мире галактик существует свой Гольфстрим?

Ответ можно было получить только после проведения многочисленных наблюдений, в которых накапливались данные о характере смещения спектральных линий для все большего и большего числа галактик. В 1929 г. американский астроном Эдвин Хаббл сообщил об установленном им законе, согласно которому скорости разлета галактик регулярно возрастают (увеличиваются их красные смещения) по мере удаления от нашей Галактики. В сочетании с отказом от антропоцентрических воззрений это открытие доказывало, что среднее рас-

стояние между галактиками непрерывно возрастает со временем; а это и свидетельствовало о нестационарности Вселенной, точнее, о ее расширении, и, следовательно, эволюции.

Как и большинство открытий, радикально изменявших наши представления о законах окружающего нас мира, открытие Э. Хаббла ввело в космологию новую величину — так называемую константу Хаббла H_0 , связывающую между собой скорости разбегания галактик v с расстоянием до этих объектов: $v = H_0 R$. Постоянная H_0 , фигурирующая здесь, имеет, очевидно, размерность, обратную времени; она, как мы увидим, играет важнейшую роль в определении основных характеристик современного состояния Вселенной.

Поясним это на следующем простом примере. Как известно, расширение любой материальной среды, в которой гравитационное взаимодействие частиц играет определяющую роль, зависит как от начальных условий этого процесса, так и от длительности самой стадии расширения. Представим себе, например, пылевой шар, расширяющийся в пустоту, каждая частичка которого обладает «хаббловской» скоростью $v = HR$. Мы будем считать, что $H(t)$ в любой фиксированный момент времени играет роль «постоянной Хаббла» для рассматриваемой задачи, а радиус шара R отсчитывается от его центра. Поместим на границу пробную точечную массу m и попытаемся проследить за возможными вариантами ее движения вместе с веществом шара.

Оказывается, что в этом случае в ходе расширения масса вещества остается неизменной, как и полная механическая энергия нашей пробной частички. Если через E_k обозначить кинетическую энергию движения частицы, а через E_p — потенциальную энергию ее взаимодействия с веществом шара, то оказывается, что в нашей задаче движение частицы будет осуществляться таким образом, чтобы сумма E_k и E_p оставалась неизменной во времени:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GmM}{R} = W = \text{const}$$

(M — масса шара, G — гравитационная постоянная).

Достаточно теперь скорость частицы выразить через $H(t)$ и учесть, что масса шара связана с его плотностью соотношением $M = 4\pi\rho R^3/3$, и мы получим

$$H^2 R^2 \left(1 - \frac{8\pi G \rho}{3H^2}\right) = \frac{2W}{m} = \text{const.}$$

Логика дальнейших рассуждений уже почти очевидна. Пользуясь связью между $H(t)$ и относительной скоростью изменения радиуса области $\Delta R/R \Delta t$, можно найти закон их изменения со временем. Понятно, что этот закон будет различным для различных вариантов начальных условий расширения шара. Если «на старте» полная энергия вещества была отрицательна, т. е. энергия самогравитации материи преобладала над кинетической энергией расширения, то разлет вещества шара неизбежно прекратится и сменится сжатием. И наоборот, если E_k оказывается больше, чем E_p , то процесс расширения будет продолжаться неограниченно долго.

Таковы в общих чертах следствия решения этой простой модельной задачи, базирующиеся на представленных ньютоновой механики. Самое интересное, однако, заключается в том, что практически без изменений они могут быть перенесены и на реальные модели Вселенной, ведь «газ» из галактик по своим свойствам во многом похож на пылевую среду. Но есть и существенные различия.

Дело в том, что большинство галактик входит в состав более крупных структурных единиц — скоплений галактик, насчитывающих, как правило, от нескольких сотен до тысяч членов, связанных в одну систему благодаря взаимному гравитационному притяжению. Естественно, в этом случае на хаббловское поле скоростей галактик накладываются собственные скорости их движения в скоплении, обязанные коллективному гравитационному взаимодействию его членов. Поэтому ясно, что для галактик в буквальной трактовке закон Хаббла неприменим. Начиная с каких масштабов поле скоростей вещества следует достаточно точно хаббловскому закону?

Современные данные по определению постоянной Хаббла приводят к величине H_0 в пределах от 50 до 100 (км/с)/Мпс. Будем далее пользоваться цифрой $H_0 = 75$ (км/с)/Мпс. Это означает, что два скопления, находящиеся друг от друга на расстоянии в 1 Мпс, должны разлетаться вследствие общего расширения Вселенной с относительной скоростью 75 км/с. Собственные скорости движения галактик в скоплениях составляют порядка сотен километров в секунду, причем их направ-

ление может быть различным. Поэтому галактики внутри скоплений могут и сближаться, что, естественно, не согласуется с законом Хаббла. В действительности этот закон в среднем справедлив для скоплений галактик, отстоящих, как правило, друг от друга на расстояниях, больших 10 Мпс. Сами скопления не расширяются, так как являются гравитационно связанными объектами. Таким образом, самые «мелкие» из структурных образований Метагалактики, которые уже участвуют в хаббловском расширении, — это скопления галактик.

Каковы же наиболее крупные из известных сегодня структурных образований материи во Вселенной, ограничивающие «сверху» масштабы ее неоднородности?

На самом деле этот вопрос является частью более общего — какова вообще иерархия структур во Вселенной? Если не говорить о планетах, то наиболее «мелкими» структурными деталями являются, очевидно, звезды. Затем идут галактики, которые, в свою очередь, объединяются чаще всего в скопления⁵. Сейчас известно около 50 сверхскоплений, которые являются качественно новым типом структурного построения Метагалактики, элементами которого выступают уже скопления. Может быть, нашему продвижению вверх по лестнице масштабов космических структур не будет конца? На смену сверхскоплениям придут новые структурные формы и т. д.?

Оказывается, что это не так. Наблюдения показывают, что сверхскопления галактик являются элементами так называемой сетчатой структуры Метагалактики, уподобляющейся «паутине». Иначе говоря, оказывается, что сама постановка вопроса о более крупномасштабных структурных формах материи в Метагалактике оказывается неправомочной — «паутинная сетка» остается «паутиной сеткой» до каких бы масштабов мы ни доходили⁶. Следовательно, в масштабах, вмещающих большое число таких ячеек, свойства Вселенной должны быть одинаковы. Таким образом, начиная с этих об-

⁵ Существуют и другие «небольшие» структурные образования, такие, например, как шаровые и рассеянные скопления звезд внутри галактик, облака межзвездного газа и др., о которых здесь нет смысла специально говорить.

⁶ Подробнее о крупномасштабной структуре Метагалактики можно узнать из популярной брошюры А. А. Клыпина и В. Г. Сурдина «Крупномасштабная структура Вселенной», М., Знание, 1981.

ластей, можно считать Вселенную бесструктурной — однородной и изотропной в среднем.

Именно поэтому любая сферическая область, мысленно выделенная нами в пространстве, будет эволюционировать так же, как и в рассмотренном несколько раньше примере. Тогда возникает любопытная возможность, основываясь на современных данных о величине средней плотности материи, «заглянуть» в будущее Вселенной и попытаться дать ответ на вопрос, будет ли ее расширение длиться неограниченно долго или же фаза расширения должна неизбежно смениться сжатием. Возвращаясь к приведенному выше примеру, мы убеждаемся, что, даже не зная начальных условий разлета пылевой материи, можно, оказывается, установить, конечно или же бесконечно расширение системы во времени. Для этого достаточно сравнить величину современной плотности материи с так называемой критической плотностью, представляющую собой комбинацию постоянной тяготения G и константы Хаббла: $\rho_{кр} = 3H_0^2/8\pi G$.

При H_0 порядка 75 (км/с)/Мпс критическая плотность примерно равна 10^{-29} г/см³. Следовательно, если наблюдения покажут, что современная плотность материи $\rho > \rho_{кр}$, то расширение мира должно смениться сжатием и, наоборот, при $\rho < \rho_{кр}$ оно будет длиться неограниченно долго. А что же реализуется в действительности? Как соотносится современная плотность материи во Вселенной с критической плотностью?

Для ответа на эти вопросы нам придется обратиться к существующим наблюдательным данным. Поскольку галактики являются одними из самых распространенных объектов космоса, рассмотрим в первую очередь вопрос о величине их вклада в полную плотность материи во Вселенной. В дальнейшем будет удобно характеризовать отношение сегодняшней плотности вещества к $\rho_{кр}$ параметром $\Omega = \rho/\rho_{кр}$. Если предположить, что все спиральные и эллиптические галактики, составляющие большинство наблюдаемых объектов, характеризуются одним и тем же (для данного типа) отношением массы к светимости L , то параметр Ω_g , учитывающий вклад в современную плотность объектов этого класса, варьируется в пределах от $0,01$ до $0,03$.

В большинстве методов определения Ω_g применяется так называемая теорема вириала, которая утверждает, что сумма потенциальной энергии гравитационного взаи-

модействия и удвоенной кинетической энергии для звезд равна нулю: $2E_k + E_p = 0$. Уже из соображений размерности становится понятным, что полная масса галактики определяется среднеквадратичной скоростью движения звезд и характерным размером галактики R_G :

$$M_G \sim v_{\text{ср}}^2 R_G G^{-1}.$$

Однако, как уже отмечалось, галактики распределены во Вселенной крайне неравномерно. Большинство из них являются составными элементами более крупных структурных образований — скоплений галактик. Поэтому, используя данные о массах и светимостях галактик, можно проверить выполнение теоремы вириала и для скоплений галактик.

Анализ этого вопроса показал, что практически для всех изученных скоплений кинетическая энергия движения галактик более чем в 3 раза превышает потенциальную. Это означает, что примерно за 1 млрд. лет скопления галактик должны были бы рассеяться в пространстве, чего, однако не наблюдается. Таким образом, имеются веские основания подозревать, что в скоплениях галактик должна существовать так называемая скрытая масса, необходимая для их стабилизации. В каких же формах может существовать эта невидимая нами материя?

Не исключено, что значительная часть массы галактик могла сосредоточиться в слабосветящихся звездах или же массивных объектах сравнительно низкой светимости (типа Юпитера). Нельзя отбросить и гипотезу о том, что в процессе формирования галактик и их скоплений значительная часть газа заполнила межгалактическое пространство и не видна вследствие низкой светимости. Эти гипотезы основываются, можно сказать, на незнании деталей образования крупномасштабной структуры Вселенной — галактик, их скоплений и сверхскоплений, но предполагают, что известен состав вещества, из которого шло формирование этих систем. В то же время нельзя исключить и возможность существования космологической скрытой массы, обусловленной наличием фонов реликтовых массивных нейтрино, первичных черных дыр или иных частиц, дошедших до сегодняшнего этапа от ранних фаз расширения мира.

Для обсуждения этой возможности потребуется обращение к имеющимся в настоящее время сценариям эволюции ранней Метагалактики, прослеживающим ос-

новые этапы приближения Вселенной к сегодняшнему состоянию. Таким образом, проблема «будущего Вселенной» может оказаться тесно связанной с проблемой ее «прошлого», отпечатки которого могут играть существенную роль как в динамике современных галактик и их скоплений, так и определять глобальные свойства пространства-времени.

Исторически первым шагом на пути открытия этих своеобразных реликтов прошлого Вселенной стало обнаружение фона микроволнового космического излучения, являющегося своеобразным зондом при исследовании свойств высокотемпературной космологической плазмы на ранних стадиях расширения.

МИКРОВОЛНОВЫЙ ФОН И ПРОШЛОЕ ВСЕЛЕННОЙ

Впервые с фактом существования микроволнового космического излучения столкнулись в 1964 г. сотрудники фирмы «Белл» Арно Пензиас и Роберт Уилсон во время испытаний высокочувствительной радиоприемной аппаратуры. Одна из задач, стоявших перед исследователями, заключалась в измерении радиошумов Галактики на высоких широтах, которые, как ожидалось, должны были носить случайный характер. Свои наблюдения А. Пензиас и Р. Уилсон начали на сравнительно коротких волнах (7,35 см), на которых галактические радиошумы должны быть минимальны. Однако первые же эксперименты не подтвердили этих предположений. Оказалось, что на длине волны 7,35 см антенна радиоприемной аппаратуры фиксировала сигнал, интенсивность которого не зависела ни от направлений измерений, ни от их продолжительности. После выяснения высокой однородности и изотропии интенсивности принимаемого космического излучения стало очевидным, что его источником не могут являться отдельные объекты как нашей, так и других галактик.

Действительно, если бы это было не так, то при изменении ориентации антенны в пространстве неизбежно возникли бы значительные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала, связанные с прохождением этих источников через диаграмму ее направленности. Отсутствие подобных вариаций наталкивало на мысль о внегалактической природе микроволнового фонового излучения. Кроме того, пересчет интенсивности этого излу-

чения на эквивалентную температуру абсолютно черного тела приводил к температуре 2,7 К, хотя, естественно, данные, полученные лишь на одной длине волны, еще не позволяли судить о характере спектра регистрируемого излучения.

С этой неопределенностью радиоастрономы справились сравнительно легко — уже спустя год после опубликования первых результатов А. Пензиаса и Р. Уилсона их коллеги П. Ролл и Д. Уилкинсон измерили температуру микроволнового фона на длине волны 3 см, а Т. Хоуэлл и Дж. Шейкшафт — на длине волны 20,7 см. Она оказалась близкой к 2,7 К. Но самым парадоксальным оказалось то, что с проявлением микроволнового фона астрономы сталкивались уже давно в оптическом диапазоне.

Еще в 1941 г. У. Адамс и А. Мак-Келлар, исследуя спектры поглощения звезд, обратили внимание на то, что в оптическом спектре молекулярного облака, расположенного на луче зрения между Землей и звездой ξ Змееносца, одна из линий молекулы CN оказалась расщепленной на три компонента с длинами волн 387,46; 387,58 и 387,40 нм. Появление первой линии могло быть связано с переходами молекул CN из основного в колебательное состояние, однако причины появления двух остальных компонентов долгое время оставались невыясненными. Уже после открытия микроволнового фона советский астрофизик И. С. Шкловский и независимо Дж. Филд и Н. Дж. Вулф дали интерпретацию этому эффекту как возникающему в результате возбуждения молекул циана квантами фонового микроволнового излучения. Оказалось, что для объяснения результатов Адамса и Мак-Келлара необходимо, чтобы эффективная температура микроволнового фона на длине волны 2,63 мм была равна как раз 2,7 К, а это прекрасно согласовалось с данными по другим диапазонам.

Итак, уже к концу 60-х годов стало ясно, что в интервале длин волн от 70 см до 3 мм распределение спектральной плотности энергии микроволнового космического фона ϵ_λ следует хорошо известному в теории излучения закону Релея—Джинса: $\epsilon_\lambda = 8\pi kT/c\lambda^2$ ($k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана). Этот результат чрезвычайно важен. Дело в том, что распределение Релея—Джинса является частным случаем так называемого планковского закона распределения числа

квантов по энергиям (или по длинам волн), характерного для ситуаций, когда излучение и, например, электроны находятся в состоянии термодинамического равновесия. В качестве примера возникновения такого распределения можно привести замкнутый сосуд, внутренняя поверхность которого идеально отражает электромагнитные волны и который заполнен высокотемпературной электрон-позитронной плазмой и излучением.

В этом идеализированном примере можно указать целый ряд микропроцессов, которые сопровождают акты взаимодействия электронов, позитронов и излучения между собой. К их числу относятся процессы упругого и неупругого рассеяния гамма-квантов на электронах и позитронах; аннигиляция электрон-позитронных пар и их «рождение» при столкновении двух фотонов и т. д. Важно, что вся эта достаточно сложная цепь взаимопревращений элементарных частиц приводит в конечном итоге к установлению термодинамически равновесного состояния, когда в системе в среднем сохраняется число частиц каждого сорта.

Отсюда становится понятным, что соответствие спектра микроволнового излучения релей-джинсовскому распределению в области малых энергий квантов является косвенным аргументом в пользу гипотезы о равновесном (планковском) характере спектра регистрируемого электромагнитного фона. Более того, было бы хорошо если экспериментально удалось бы показать, что обнаруженное А. Пензиасом и Р. Уилсоном излучение соответствует равновесному распределению квантов во всех диапазонах длин волн.

Это означало бы, что оно сформировалось в эпоху, когда излучение и вещество находились в состоянии термодинамического равновесия, последнее же, как мы увидим, возможно лишь при очень высоких температурах и плотностях космологической плазмы в далеком прошлом. Таким образом, микроволновое электромагнитное излучение может нести в себе информацию о физических процессах, разыгрывавшихся в плазме в тот период, и тогда его в полном смысле следует назвать реликтовым (применительно к этому излучению этот термин ввел И. С. Шкловский).

Иначе говоря, для того чтобы делать какие-либо космологические выводы из факта существования реликтового излучения, прежде всего необходимо было убе-

даться в планковском характере его спектра. Эта проблема, возникшая буквально с момента открытия реликтового излучения, сохраняет свою актуальность и по сей день. Дело в том, что регистрация квантов электромагнитного излучения в миллиметровой и субмиллиметровой областях спектра сталкивается с трудностями, обусловленными, в частности, непрозрачностью земной атмосферы. Даже на современном уровне развития радиоастрономического эксперимента данные, получаемые с помощью высокоатмосферных баллонов и космических аппаратов, обладают существенным разбросом и, как правило, приводят к более высоким значениям температуры микроволнового фона, чем в релей-джинсовском диапазоне.

Последние результаты, полученные в экспериментах американских исследователей Д. Вуди и П. Ричардса на аппаратуре, выведенной за пределы плотных слоев атмосферы, приводят к температуре микроволнового излучения 2,99 К в диапазоне длин волн от 0,06 до 0,2 см. Это примерно на 15% выше температуры, измеряемой в релей-джинсовском диапазоне. Остается пока невыясненным, связан ли этот сравнительно небольшой избыток квантов высоких энергий с реальными особенностями спектра реликтового излучения или же он вызван аппаратурными погрешностями измерений. Однако даже при учете подобной неопределенности можно констатировать, что с точностью не хуже 15% фоновое электромагнитное излучение имеет практически равновесный спектр.

Плотность энергии реликтового излучения доминирует над электромагнитным излучением космоса практически во всех диапазонах длин волн. На рис. 1 приведены данные о спектральной плотности энергии космического фонового излучения, начиная от длинноволнового радиоизлучения галактик и заканчивая жесткими гамма-излучением. На рис. 1 видно, что основная доля плотности энергии фонового электромагнитного излучения приходится именно на реликтовое излучение, для которого $\epsilon_r = 4 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³.

Для того чтобы понять, сколь существенно для динамики расширения Вселенной это излучение, необходимо сравнить плотность его энергии с плотностью энергии нерелятивистской материи, распределенной в пространстве в форме галактик и их скоплений. В преды-

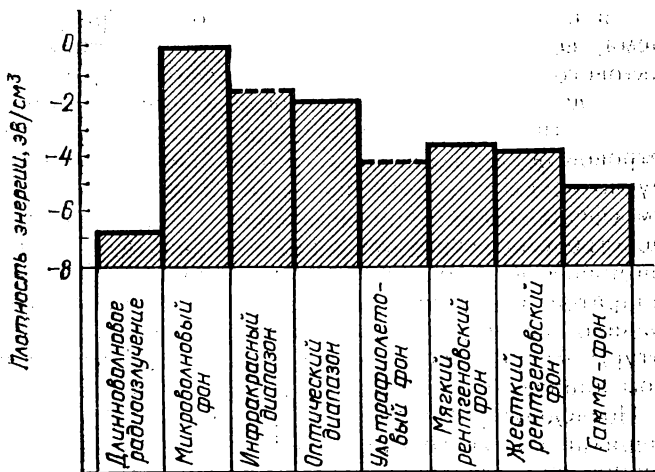


Рис. 1. Плотность энергии космического фонового излучения для различных диапазонов спектра

душем разделе мы уже отмечали, что в отсутствии скрытой массы Вселенной плотность «светящейся материи» близка к 10^{-30} г/см³. Учитывая, что $\epsilon_m = \rho_m c^2 \approx 9 \cdot 10^{-10}$ эрг/см³ (где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме), не представляет труда оценить относительный вклад микроволнового излучения в темп расширения современной Вселенной. Из того факта, что отношение ϵ_r к ϵ_m сегодня не превышает 1%, становится понятно, что роль этого компонента практически несущественна. Как изменится ситуация по мере углубления в прошлое Вселенной?

Для ответа на этот вопрос обратимся к следующему мысленному эксперименту. Представим себе, что задолго до сегодняшнего момента времени некий источник электромагнитных волн посылает к нам сигнал, длина волны которого в момент испускания равна λ_i . В силу нестационарности Вселенной это излучение будет сегодня обладать длиной волны λ_0 , причем несовпадение λ_i и λ_0 обусловлено доплеровским смещением частоты квантов по мере их распространения от источника к наблюдателю. Можно ввести количественную характеристику этого сдвига, обозначив через красное смещение z_i следующую комбинацию λ_i и λ_0 :

$$z_i = \frac{\lambda_0 - \lambda_i}{\lambda_i}$$

Получающаяся из этой формулы простая связь между длинами волн испущенного и регистрируемого излучений $\lambda_0 = \lambda_i(1 + z_i)$ показывает, что по мере расширения Вселенной от эпохи с красным смещением z_i до современной эпохи с $z=0$ произошло увеличение λ_i в $(1 + z_i)$ раз. Понятно, что и пространственные масштабы, связанные с кинематическими характеристиками расширения, будут претерпевать аналогичное увеличение, поскольку в качестве эталона измерения последних мы можем использовать длины волн электромагнитного излучения. В частности, радиус произвольной сферической области будет изменяться по мере расширения Вселенной как $R_0 = R_i(1 + z_i)$.

Однако в некоторых случаях более удобной оказывается временная шкала измерений, и целесообразно установить связь между этим способом описания динамики расширения и шкалой красных смещений. Для этого необходимо воспользоваться уравнениями ОТО, в рамках которых геометрические характеристики пространства-времени находятся, как уже отмечалось, в зависимости от таких характеристик материи, как плотность энергии и давление. И наоборот, ОТО предсказывает, что изменение геометрии пространства оказывает влияние на материю, в результате чего эволюция пространства-времени и эволюция материи оказываются внутренне самосогласованными.

Применительно к космологии эта связь носит достаточно простой характер — материя однозначно определяет скорость расширения Вселенной, в ходе которого происходит изменение ее плотности и давления. Для «газа» массивных частиц, которыми, собственно, и являются скопления и сверхскопления галактик во Вселенной, полная масса вещества, заключенного в сферической области радиуса R , должна сохраняться в ходе расширения. Поскольку объем этого шара возрастает по мере уменьшения красного смещения как $(1 + z)^{-3}$, очевидно, что полная плотность вещества этой области будет убывать пропорционально $(1 + z)^3$.

Но если бы аналогичными методами мы попытались рассмотреть поведение плотности энергии электромагнитного излучения по мере изменения красного смеще-

ния, нам пришлось бы принять в расчет эффект доплеровского смещения частоты квантов и, следовательно, отказаться от условия сохранения массы излучения. В этом случае ϵ_η — плотность энергии квантов с частотой ν — можно оценить как произведение их энергии $h\nu$ на концентрацию n_η (где $h=6,63 \cdot 10^{-27}$ эрг/с — постоянная Планка). Полная плотность энергии квантов во всех диапазонах частот ϵ_r получается суммированием этих произведений, что с учетом изменения по z каждого из сомножителей, приводит к зависимости $\epsilon_r \sim (1+z)^4$.

Теперь, зная, как вещество и излучение реагируют на нестационарность Вселенной, можно установить взаимосвязь между длительностью расширения и соответствующими значениями красных смещений. Как упоминалось, она дается уравнениями ОТО, позволяющими определить мгновенное значение «постоянной» Хаббла для каждого этапа расширения мира

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3} \left[\rho_m(z) + \frac{\epsilon_r(z)}{c^2} \right],$$

где $G=6,68 \cdot 10^{-8}$ дин·см²/г² — гравитационная постоянная. Отсюда, в частности, следует, что величина $H(t)$ существенным образом зависит от отношения плотности вещества к плотности энергии электромагнитного излучения и это отношение уменьшается по мере увеличения красного смещения соответствующих эпох.

Таким образом, мы автоматически приходим к выводу о том, что в далеком прошлом динамика расширения Вселенной в основном определялась электромагнитным излучением, плотность энергии которого при $z \gg 10^3$ значительно превышала плотность энергии нерелятивистской материи. Кроме того, ясно, что в этот период во Вселенной не могли существовать ни галактики, ни их скопления, поскольку среднее расстояние между ними (в пересчете от современного значения и до эпохи с $z > 10^3$) оказалось бы меньше их собственных размеров. Следовательно, космологическая плазма и излучение должны были однородно заполнять Вселенную, еще не обладающую какой бы то ни было структурностью.

Эти выводы, очевидно, базируются на решении так называемой «обратной задачи» — предсказании свойств Вселенной в прошлом, основу которого составляют характеристики ее современного состояния. Сегодня нам

известен лишь результат предшествующей эволюции Вселенной: фон микроволнового реликтового излучения, химический состав вещества и наличие крупномасштабных структурных единиц материи — скоплений и сверхскоплений галактик. Таким образом, возникает проблема выяснения «начальных условий», определивших именно данный и ни какой-либо иной ход ее эволюции.

Здесь мы вплотную сталкиваемся с необходимостью обратиться к существующим представлениям об основных этапах «температурной» истории Вселенной для того, чтобы, с одной стороны, рассмотреть наиболее вероятный механизм возникновения реликтового излучения, а с другой — дать ответ на вопрос, каким же образом и почему во Вселенной возникли скопления и сверхскопления галактик.

Следует подчеркнуть, что современная космология еще далека от окончательного решения этих проблем. В настоящее время существует целый «спектр» теоретических моделей, объясняющих в общих чертах характеристики современного состояния мира и резко различающихся в выборе «начальных условий» его расширения. Фактически, каждая из этих схем описывает один из возможных эволюционных треков, сходящихся, образно говоря, к сегодняшнему состоянию. Далее рассмотрим лишь одну из таких моделей, которая оптимально объясняет набор существующих экспериментальных данных. В научной литературе этот сценарий называют стандартной моделью или моделью Большой взрыв.

СЦЕНАРИЙ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

Как и любая схема, претендующая на объяснение данных о спектре микроволнового космического излучения, химического состава догалактического вещества и иерархии масштабов космических структур, стандартная модель эволюции Вселенной базируется на ряде исходных предположений (о свойствах материи, пространства и времени), играющих роль своеобразных «начальных условий» расширения мира. В качестве одной из рабочих гипотез этой модели выступает предположение об однородности и изотропии свойств Вселенной на протяжении всех этапов ее эволюции.

Кроме того, основываясь на данных о спектре микро-

волнового излучения, естественно предположить, что во Вселенной в прошлом существовало состояние термодинамического равновесия между плазмой и излучением, температура которого была высока. Наконец, экстраполируя в прошлое законы возрастания плотностей вещества и энергии излучения, нам придется предположить, что уже при температуре плазмы, близкой к 10^{10} К, в ней существовали протоны и нейтроны, которые были ответственны за формирование химического состава космического вещества.

Очевидно, что подобный комплекс «начальных условий» нельзя формально экстраполировать на самые ранние этапы расширения Вселенной, когда температура плазмы превышала 10^{12} К, поскольку в этих условиях произошли бы качественные изменения состава материи, связанные, в частности, с кварковой структурой нуклонов. Этот период, предшествующий этапу с температурой около 10^{12} К, естественно отнести к сверхранним стадиям расширения Вселенной, о которых, к сожалению, в настоящее время известно еще очень мало.

Дело в том, что по мере углубления в прошлое Вселенной мы неизбежно сталкиваемся с необходимостью описывать процессы взаимопревращений элементарных частиц со все большей и большей энергией, в десятки и даже тысячи раз превышающей порог энергий, доступных исследованию на самых мощных современных ускорителях. В подобной ситуации, очевидно, возникает целый комплекс проблем, связанных, во-первых, с нашим незнанием новых типов частиц, рождающихся в условиях высоких плотностей плазмы, а во-вторых, с отсутствием «надежной» теории, позволившей бы предсказать основные характеристики космологического субстрата в этот период.

В одном из последующих разделов мы еще вернемся к обсуждению этой проблемы, рассмотрев один из наиболее вероятных вариантов создания такой теории. Однако даже не зная в деталях конкретных свойств сверхплотной плазмы при высоких температурах, можно предположить, что, начиная с температуры чуть меньше 10^{12} К, ее характеристики удовлетворяли условиям, перечисленным в начале этого раздела. Иначе говоря, при температуре около 10^{12} К материя во Вселенной была представлена электрон-позитронными парами (e^- , e^+); мюонами и антимюонами (μ^- , μ^+); нейтрино и антиней-

трино, как электронными ($\nu_e, \bar{\nu}_e$), так и мюонными ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$) и тау-нейтрино ($\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)⁷; нуклонами (протонами и нейтронами) и электромагнитным излучением.

Как мы упоминали, взаимодействие всех этих частиц обеспечивало в плазме состояние термодинамического равновесия, которое, однако, изменилось по мере расширения Вселенной для различных типов частиц. При температурах меньше 10^{12} К первыми это «почувствовали» мюон-антимюонные пары, энергия покоя которых составляет примерно 106 МэВ⁸. Затем уже при температуре порядка $5 \cdot 10^9$ К аннигиляция электрон-позитронных пар стала преобладать над процессами их рождения при взаимодействии фотонов, что в конечном итоге привело к качественному изменению состава плазмы.

Начиная с температур $T \leq 10^9$ К, основную роль в динамике расширения Вселенной стали играть электронные, мюонные и тау-нейтрино, а также электромагнитное излучение. Как же перераспределилась энергия, которая была «запасена» на лептонной стадии в массивных частицах?

Оказывается, она пошла на «нагрев» излучения, а вместе с тем и частиц, находящихся при температурах больше $5 \cdot 10^9$ К в равновесии с излучением. Действительно, небольшое увеличение плотности фотонов, вызванное аннигиляцией мюонов и антимюонов, автоматически приводит к увеличению концентрации электрон-позитронных пар, которые взаимодействуют с фотонами в реакции $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$. В свою очередь, электроны и позитроны могут рождают пары нейтрино и антинейтрино.

Таким образом, весь избыток энергии мюонов после их аннигиляции перераспределится между различными компонентами плазмы. Подобная «перекачка» энергии массивных частиц ко все более легким должна была осуществляться лишь до тех пор, пока не стали аннигилировать самые легкие заряженные лептоны — электроны и позитроны, которые в последний раз «подогрели»

⁷ В ядерной физике для перечисленных выше типов частиц употребляется термин «лептоны». В дальнейшем этап доминирования плотности этих частиц во Вселенной мы будем называть лептонной эрой.

⁸ Энергии частиц в 1 эВ соответствует температура плазмы $1,16 \cdot 10^4$ К.

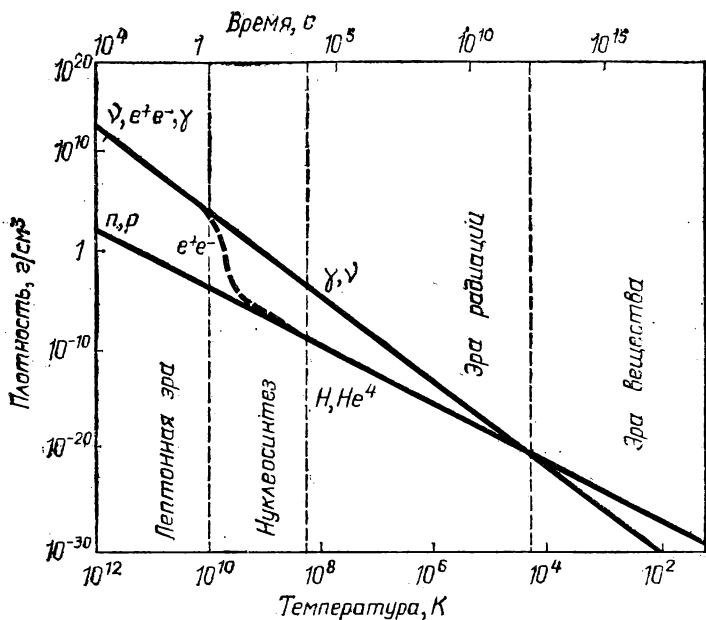


Рис. 2. «Температурная» история Вселенной согласно схеме Большого взрыва.

излучение при температуре около $5 \cdot 10^9$ К. После этого момента доминирующую роль в расширении Вселенной играло электромагнитное излучение, и лептонная эра «температурной» истории космической плазмы сменилась эрой преобладания радиации (рис. 2).

О неизбежности существования этого этапа во Вселенной мы уже говорили, когда рассматривалось поведение плотностей вещества и излучения в пределе больших красных смещений. Теперь с эрой преобладания излучения мы сталкиваемся в рамках модели Большого взрыва, приближаясь к этому периоду со стороны более ранних стадий.

Фактически именно в этот период при температурах плазмы около $5 \cdot 10^9$ К произошло формирование равновесного спектра электромагнитного излучения, дошедшего до нас в форме микроволнового реликтового фона.

Именно в ходе аннигиляции электрон-позитронных пар практически вся энергия, запасенная в этом компоненте, была передана электромагнитному излучению, плотность энергии которого увеличилась. Оставшиеся от эпохи аннигиляции электроны, сталкиваясь с квантами излучения, участвовали в обмене энергией между подсистемами плазмы. Кроме того, столкновения электронов с протонами сопровождалось высвечиванием квантов, в результате чего спектр электромагнитного излучения должен был стать характерным для равновесного распределения.

Уже в конце эпохи доминирования радиации при температурах, близких к 10^4 К, взаимодействие свободных электронов с протонами сопровождалось образованием атомов водорода и уменьшением доли свободных носителей электрического заряда. При этом рассеяние квантов на электронах становилось все менее эффективным и, наконец, начиная с периода, характерного падением температуры ниже 3000 К, распространение фотонов осуществлялось практически свободно. Температура электромагнитного излучения после его отделения от плазмы уменьшалась лишь вследствие расширения Вселенной, которое смещало спектр квантов в миллиметровый и сантиметровый диапазоны.

Этот микроволновый фон является, таким образом, своеобразным отпечатком ранних высокотемпературных стадий эволюции Вселенной — реликтом, доказывающим, что в прошлом эта подсистема определяла основные характеристики космологической плазмы. Однако помимо фона микроволнового излучения, до нас должен был дойти еще один «отзвук» радиационно доминированной эры расширения Вселенной. Речь идет о ядрах и изотопах легких химических элементов, образование которых в рамках модели Большого взрыва должно было произойти примерно за миллион лет до эпохи отделения вещества от излучения.

История вопроса о происхождении химических элементов восходит к пионерским работам основоположника теории «горячей Вселенной» Г. А. Гамова. Задача, которую ставили перед собой Г. А. Гамов и его сотрудники в конце 40-х годов нашего столетия, с позиций сегодняшнего дня представляется неразрешимой. Авторы надеялись с помощью процессов слияния протонов и нейтронов в ядра химических элементов объяснить про-

исхождение практически всех элементов таблицы Менделеева еще на ранних этапах расширения Вселенной. В те годы, когда ядерная физика делала буквально первые шаги, еще не было известно, что в природе не существует стабильных ядер с атомными весами $A=5$ и $A=8$, и цепочка последовательных присоединений протонов и нейтронов с образованием дейтерия, гелия-3, трития и гелия-4 имеет обрыв уже буквально на следующем шаге.

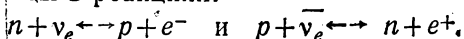
Г. А. Гамова вдохновляла еще одна, как теперь ясно, неверная предпосылка. В те годы постоянную Хаббла считали в 5—10 раз большей, чем находят сейчас. Отсюда следовало, что возраст Метагалактики должен был составлять лишь несколько миллиардов лет, т. е. столько же, сколько, согласно геологическим данным, «живет» Земля. Поэтому казалось, что все химические элементы «от мала до велика» должны были сформироваться в едином процессе космологического нуклеосинтеза, если, конечно, предполагать, что Вселенная в прошлом была горячей. Г. А. Гамов предсказал и современную температуру реликтового излучения — порядка 5 К, как видим, значение, весьма близкое к действительности.

На самом же деле, из-за того что возраст Метагалактики на порядок больше, чем предполагал Г. А. Гамов, в термоядерном котле горячей Вселенной успели бы «свариться» только самые легкие элементы (до гелия, а возможно, до лития включительно). Затем температура упала вследствие расширения настолько, что дальнейший синтез элементов должен был остановиться. Более тяжелые элементы, как теперь предполагают, образовались в термоядерных реакциях в недрах звезд и при вспышках Сверхновых.

Как часто случалось в истории науки, несмотря на неверные предпосылки, Г. А. Гамов «угадал» горячее прошлое Вселенной, триумфально подтвержденное открытием реликтового радифона. Каким же образом в высокотемпературной плазме формировался изотопный состав догалактического вещества?

Оказывается, одну из главных ролей в этом процессе играли реакции слабого взаимодействия электронных нейтрино и антинейтрино с протонами и нейтронами. Еще на лептонной эре расширения Вселенной при температуре выше 10^{10} К столкновения нейтрино ν_e и $\bar{\nu}_e$

с протонами p и нейтронами n эффективно перемешивали эти частицы в реакциях:



Начиная с температуры 10^{10} К, характерное время этих реакций близко к возрасту Метагалактики, и они приостанавливаются. Расчеты показывают, что к этому моменту концентрация нейтронов стала меньше концентрации протонов из-за небольшой разности их энергий покоя $\Delta mc^2 = (m_n - m_p)c^2 = 1,28$ МэВ:

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta mc^2}{kT}\right) \approx 0,2.$$

Этот контраст «замораживался» практически до тех пор, пока температура не уменьшилась до 10^9 К. После этого вся последовательность взаимопревращения нуклонов в ядра ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$ осуществлялась в два этапа. На первом при температурах плазмы порядка 10^9 К происходило слияние протонов и нейтронов в ядра дейтерия $n + p \leftrightarrow {}^2\text{H} + \gamma$. Расчеты показывают, что до тех пор, пока практически все протоны и нейтроны не связались в ядра дейтерия, гелия-3 (${}^2\text{H} + p \leftrightarrow {}^3\text{He} + \gamma$) и трития (${}^2\text{H} + n \leftrightarrow {}^3\text{H} + \gamma$), синтез ${}^4\text{He}$ происходил крайне неэффективно. После этого в действие вступили столкновения ядер дейтерия между собой и с ядрами ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$, приведшие к появлению ядер гелия-4, причем длительность этапа синтеза ${}^4\text{He}$ крайне мала.

На рис. 3 для иллюстрации динамики космологического нуклеосинтеза приведена зависимость массовых концентраций легких химических элементов от температуры плазмы. Как видно, уже при температуре $5 \cdot 10^7$ К сформировался практически весь первичный химический состав вещества: около 23—26% нуклонов связалось в ядра ${}^4\text{He}$; 74—77% по массе составляет водород и лишь 0,01—0,0001% — дейтерий, гелий-3 и тритий. Заслуживает внимания то обстоятельство, что распространенность дейтерия во Вселенной весьма чувствительна к современной плотности вещества. При изменении $\rho_{m(0)}$ от $1,4 \cdot 10^{-31}$ до $7 \cdot 10^{-30}$ г/см³ его относительная концентрация (${}^2\text{H}/\text{H}$) уменьшается практически на семь порядков. В меньшей мере от величины современной плотности барионов зависит массовое содержание ${}^4\text{He}$, однако и оно возрастает примерно в 2 раза.

Этой особенностью можно воспользоваться для предсказания сегодняшней плотности вещества во Вселен-

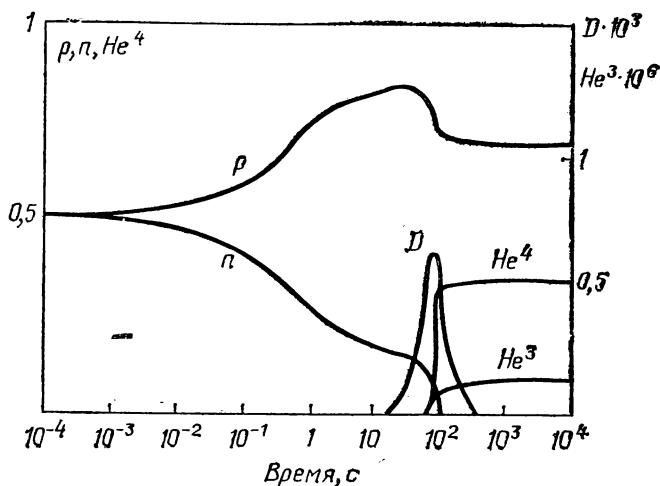


Рис. 3. Массовые концентрации (в относительных единицах) легких элементов на первых стадиях расширения Вселенной

ной, если известна наблюдаемая распространенность космических гелия-4 и дейтерия. Однако значительным препятствием на пути реализации этой программы является искажение первичного химического состава вещества на стадии существования галактик и звезд. Например, в Солнечной системе измерения дают примерно 20—26%-ную вариацию массовой концентрации 4He относительно водорода. В солнечном ветре эта величина колеблется еще значительно — от 15 до 30%.

Спектроскопические измерения линий поглощения и эмиссии гелия в атмосферах, ближайших к Солнцу звезд, свидетельствуют также о наличии вариаций в его массовой концентрации от 10 до 40%. Присутствие 4He обнаруживают и в наиболее старых объектах нашей Галактики — шаровых скоплениях, где его распространенность колеблется от 26 до 28%. Все это, естественно, снижает преимущества использования данных о галактическом содержании 4He для определения величины современной плотности вещества, совместимой с моделью Большого взрыва.

В этом аспекте более информативными оказываются данные, получаемые из сопоставления космологической продукции дейтерия и его современной распространен-

ности в Галактике. В отличие от ^4He этот изотоп лишь выгорает в ходе образования звезд, и, следовательно, сегодня речь может идти лишь об определении нижней границы его плотности массы. Наблюдения линий поглощения атомарного дейтерия в межзвездной среде, а также регистрация излучения молекул HD, DCN показывают, что содержание этого изотопа в Галактике составляет примерно в пределах от 0,001 до 0,00001% от массы водорода. Это соответствует современной плотности вещества $\rho_{\text{м}0} \approx 1,4 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$.

Любопытно, что, помимо объяснения химического состава ранней Метагалактики, теория космологического нуклеосинтеза позволяет получить уникальную информацию о пространственной плотности труднонаблюдаемых частиц, дошедших до эпохи доминирования лептонов от предыдущих этапов космологического расширения. В частности, основываясь на этой теории, можно ограничить число возможных типов нейтрино, которые в последнее время стали объектом пристального внимания космологов.

Еще каких-нибудь 6—7 лет назад этот вопрос стоял как бы на втором плане в модели «горячей Вселенной». Считалось, что решающую роль в формировании химического состава догалактического вещества играли электронные нейтрино и антинейтрино и в меньшей степени — мюонные нейтрино $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$. Эксперимент не давал оснований предполагать, что в природе существуют иные типы слабо взаимодействующих нейтральных лептонов, а космологи предпочитали руководствоваться принципом «бритвы Окаама»: *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* («сущности не должны быть умножаемы сверх необходимости»).

Ситуация в этом вопросе радикально изменилась после открытия в 1975 г. тяжелого заряженного тау-лептона, которому должен был соответствовать новый тип нейтрино — ν_τ . Сейчас уже не вызывает сомнений, что семейство нейтрино пополнилось новым членом, энергия покоя которого не превышает 250 МэВ. Возникла любопытная ситуация — современные ускорители элементарных частиц приблизились лишь к энергиям порядка 10^5 МэВ и уже появился новый тип нейтрино. Что кроется за этим порогом энергий? Не ожидает ли нас в будущем катастрофическое увеличение числа членов

семейства лептонов по мере проникновения в глубь микромира?

Оказывается, на этот вопрос модель «горячей Вселенной» дает вполне определенный ответ. Если бы в природе, помимо ν_e , ν_μ , ν_τ , существовали новые типы нейтрино, энергии покоя которых не превышали бы 30—50 эВ, их роль в период космологического нуклеосинтеза свелась бы к увеличению скорости охлаждения плазмы и, следовательно, изменились бы условия образования химических элементов. Впервые подобная роль слабо-взаимодействующих частиц в динамике космологического синтеза легких химических элементов была отмечена в 1969 г. советским астрофизиком В. Ф. Шварцманом, и за последнее десятилетие уточнялась лишь количественная сторона вопроса.

Расчеты показывают, что если за верхнюю границу распространенности догалактического гелия-4 принять его массовую концентрацию 25%, то неизбежно следует вывод, что все возможные типы нейтрино в природе уже открыты. С некоторой осторожностью, связанной с недостаточной точностью наблюдательных данных о распространенности космических ${}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}$, можно считать, что, помимо ν_e , ν_μ , ν_τ , существует не более еще двух типов новых нейтрино. Это обстоятельство, как мы увидим дальше, играет существенную роль при анализе проблемы скрытой массы Вселенной.

Итак, в общих чертах мы познакомились с двумя важнейшими эпохами «температурной» истории космологической плазмы, на протяжении которых произошло формирование первичного химического состава вещества и спектра микроволнового реликтового излучения. Однако изложенная выше схема нуждается в существенном дополнении, поскольку в ней не нашел еще отражения факт существования крупномасштабной структуры Вселенной — скоплений и сверхскоплений галактик.

Действительно, после аннигиляции электрон-позитронных пар во Вселенной ($T \approx 5 \cdot 10^9$ К) наиболее распространенным компонентом высокотемпературной космологической плазмы стало электромагнитное излучение, которое после рекомбинации водорода перестало взаимодействовать с веществом. Равновесный характер спектра этого излучения обусловлен существованием продолжительной фазы расширения, когда между фо-

тонами и электронами происходило интенсивное взаимодействие. После рекомбинации водорода и гелия Вселенная должна была оказаться заполненной однородно распределенными веществом и излучением. И сейчас не должно было быть никакой структуры — ни звезд, ни галактик, ни нас. Вполне удручающая картина.

Эти предсказания, очевидно, весьма далеки от наблюдаемого многообразия структурных форм материи во Вселенной. Напрашивается вывод, что для объяснения наблюдаемой структуры, еще на ранних этапах расширения Вселенной должны существовать флуктуации — хотя и малые, но конечные отклонения плотности материи от однородного и изотропного распределения в пространстве. Таким образом, следующим шагом в развитии модели Большого взрыва является объяснение механизма возникновения крупномасштабной структуры Вселенной, на котором мы хотим остановиться несколько подробнее.

ОБРАЗОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ

Мы отмечали, что всеми явлениями в природе управляют четыре фундаментальных типа взаимодействия элементарных частиц: электромагнитное, сильное (ядерное), слабое и гравитационное. На протяжении всей «температурной» истории расширения Вселенной каждое из перечисленных выше взаимодействий играло определяющую роль в конкретном типе процессов, обусловивших в конечном итоге современный облик Вселенной.

Мы видели, что формирование спектра микроволнового реликтового излучения обязано в основном электромагнитному взаимодействию фотонов и электронов в период лептонной эры эволюции космологической плазмы. В ходе термоядерного синтеза легких химических элементов решающую роль играли процессы слабого взаимодействия протонов и нейтронов с электронными нейтрино и сильного взаимодействия между нуклонами при их слиянии в ядра дейтерия и гелия. Продолжая эту аналогию, можно сказать, что решающая роль в возникновении крупномасштабной структуры Вселенной принадлежит самому «слабому» из перечисленных выше типов взаимодействий — гравитационному.

В отличие от первых трех типов, обуславливающих свойства процессов взаимодействия элементарных частиц в масштабах, сравнимых с размером атомного ядра, гравитационное взаимодействие возрастает по мере увеличения числа частиц. Поэтому для таких гигантских (по сравнению с объектами микромира) систем, как галактики и их скопления, гравитационное взаимодействие частиц становится одним из главных.

Это утверждение безусловно верно для современных структурных единиц Метагалактики — звезд, галактик и их скоплений. Однако в далеком прошлом ситуация была гораздо сложнее. В эпоху, соответствующую красным смещениям $z > 1000$, вещество и излучение взаимодействовали друг с другом. При этом давление радиационной плазмы превалировало над гравитационными силами притяжения частиц в областях повышенной (относительно среднего уровня) плотности вещества и энергии излучения в масштабах порядка сотен тысяч диаметров Солнца.

В больших масштабах основная роль принадлежала гравитационному притяжению частиц, благодаря которому области повышенной плотности сжимались под действием собственной тяжести и еще более усиливали исходный контраст над невозмущенной материей. После отделения вещества от излучения (при $z < 1000$) этот механизм начал работать практически во всех масштабах. В результате флуктуации плотности настолько усилились, что их собственное тяготение привело к сжатию неоднородностей, завершившемуся образованием гравитационно связанных систем.

Однако детали этого процесса существенно зависят от конкретного типа малых «затравочных» флуктуаций плотности в космологической среде. Оказывается, в космологической плазме возможно было развитие нескольких типов протогалактических флуктуаций. Рассмотрим два из них.

В областях повышенной и пониженной (относительно среднего уровня) плотности вещество и излучение могут быть распределены таким образом, что в этих зонах остается неизменным отношение полного числа фотонов к барионам — так называемая удельная энтропия излучения S . Этот тип возмущений принято называть адиабатическим, поскольку он не приводит к вариациям в пространстве величины S , равной

$S = \frac{4}{3} \frac{\sigma T^3 m_p}{k \rho_m}$; m_p — масса протона.

Во Вселенной мог реализоваться и иной тип догалактической иррегулярности, когда вещество образовывало как бы островки повышенной и пониженной плотности на фоне практически однородно распределенного излучения. В этом случае удельная энтропия флуктуирует в пространстве (отсюда и происхождение термина — энтропийные возмущения⁹).

Как упоминалось ранее, при $z > 10^3$ процессы рассеяния квантов на электронах определяли динамику развития неоднородностей. Адиабатические и энтропийные неоднородности по-разному реагировали на эти процессы. Для адиабатических возмущений, сегодняшний размер которых не превышал бы расстояния между скоплениями галактик, сглаживание исходного контраста плотности происходило благодаря вязкости и теплопроводности плазмы. Расчеты эволюции адиабатических возмущений в период рекомбинации водорода показывают, что уже при $T \approx 3000$ К характерный масштаб «выживающих» неоднородностей охватывал область вещества массой в 10^{15} солнечных.

Этот результат представляется чрезвычайно важным — оказывается, в расширяющейся горячей Вселенной процессы диссипации (сглаживания) первичных адиабатических неоднородностей естественным образом выделяли в их спектре характерный масштаб, соответствующий скоплениям и сверхскоплениям галактик.

В отличие от адиабатических первичные энтропийные возмущения представляли собой стационарные сгустки и разрежения вещества, сохранявшие начальный контраст плотности вплоть до момента равенства плотностей вещества и излучения (или, если сегодняшняя плотность вещества $\rho_{m(0)}$ близка к $1,4 \cdot 10^{-31}$ г/см³, до момента рекомбинации водорода). Для этих возмущений характерный масштаб соответствует массам типичных шаровых скоплений или карликовых галактик.

⁹ Существует точка зрения, согласно которой возникновение структуры во Вселенной обязано своим происхождением третьему типу неоднородностей — вихревым движениям, которые, однако, несовместимы с моделью Большого взрыва. Детально «вихревая» теория развита в трудах советских астрофизиков Л. М. Озерного и А. Д. Чернина и их коллег. В популярном изложении см.: Озерной Л. М. Происхождение и жизнь галактик. М., Знание, 1978.

Однако следует подчеркнуть, что в процессе сжатия вещества (как в адиабатических, так и энтропийных возмущениях) в период, когда собственное тяготение играло определяющую роль, могла происходить значительная перестройка характерных масштабов, связанная как с возможным дроблением протоскоплений, так и объединением мелких структурных единиц в более крупные. В этой связи становится понятно, что изложенная выше схема образования структуры во Вселенной сильно упрощена. Пока еще остается неясным, были ли начальные флуктуации только адиабатическими или энтропийными или же они представляли собой смесь адиабатического и энтропийного компонентов.

Очевидно, для ответа на эти вопросы недостаточно данных о характере распределения вещества во Вселенной на современном этапе. Необходимо привлечь дополнительные соображения, позволяющие «заглянуть» во Вселенную в том ее виде, который существовал еще задолго до периода образования галактик и их скоплений. В этом вопросе на помощь снова приходит реликтовое излучение.

Оказывается, о характеристиках протогалактических возмущений космологической плазмы можно судить, измеряя уровень вариаций интенсивности микроволнового излучения в различных направлениях. Если в период рекомбинации водорода, когда происходило «замораживание» спектра этого излучения, существовали малые отклонения от однородности и изотропии распределения материи во Вселенной, то они должны были оставить свой отпечаток на спектре микроволнового фона, приводя к флуктуациям его температуры.

Представим себе, что некоторый макроскопический объем плазмы движется как целое со скоростью v относительно изотропного фона излучения. Для наблюдателя, сопутствующего этому движению, равновесное распределение квантов остается неизменным, поскольку рассеяние фотонов на электронах не меняет их энергий. Однако в системе отсчета, покоящейся относительно реликтового излучения, в распределении квантов по импульсам возникает доплеровское смещение, пропорциональное отношению скорости v к скорости света.

При малых этих отношениях такое смещение было эквивалентно небольшому искажению температуры излучения в этой области, причем, зная связь между ско-

ростью движения плазмы и начальным контрастом ее плотности, не представляет труда оценить величину избытка температуры, который оказывается равным $\Delta T/T = (1-4) \cdot 10^{-4}$. Итак, обнаружив вариации температуры реликтового излучения, можно, образно говоря, измерить начальную амплитуду адиабатических возмущений плотности для космологической среды и, следовательно, судить о характере догалактической иррегулярности Вселенной.

Вот уже почти 15 лет астрофизики всего мира с нетерпением ждут, когда же подобные вариации будут, наконец, найдены и тем самым будет решена одна из важнейших проблем современной космологии. Однако пока наблюдения уверенно не обнаруживают подобных флуктуаций на уровне $\Delta T/T = 8 \cdot 10^{-5}$. Не означает ли это, что крупномасштабная структура Вселенной обязана своим происхождением первичным энтропийным неоднородностям?

Расчеты показывают, что в этом случае ожидаемый уровень вариаций температуры реликтового излучения будет порядка 10^{-4} . Это хотя и несколько ниже, чем в адиабатическом варианте, но все же выше экспериментального предела. Почему же мелкомасштабная анизотропия реликтового радифона столь мала? Что могло ослабить флуктуации его температуры после рекомбинации водорода во Вселенной?

Быть может, здесь мы сталкиваемся с проявлением возможно существующих реликтовых носителей скрытой массы, радикально изменивших состояние плазмы в эпоху отделения вещества от излучения? Таким образом, мы вплотную подошли к одной из самых молодых проблем современной космологии — проблеме существования фона реликтовых гравитирующих частиц, дошедших до нас от ранних высокотемпературных фаз расширения Вселенной.

МАССИВНЫЕ НЕЙТРИНО И ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Толчком к развитию этого нового направления в космологии стали результаты многолетних экспериментов, выполненных группой В. А. Любимова в Институте теоретической и экспериментальной физики АН СССР. Наблюдая за распадами ядер трития на гелий-3, электрон и антинейтрино $\bar{\nu}_e$, эти исследователи пришли к выводу

о существовании весьма малой (порядка 10—30 эВ) энергии покоя у электронных нейтрино и антинейтрино. До получения дополнительных данных результаты этих экспериментов следует рассматривать, естественно, как предварительные, однако сам факт возможной массивности нейтрино заслуживает пристального внимания.

Стандартная модель эволюции Вселенной предсказывает существование периода термодинамического равновесия между этими частицами и электрон-позитронными парами, когда концентрация ν_e и $\bar{\nu}_e$ была сравнима с распространенностью квантов излучения. Подобно тому, как кванты электромагнитного излучения испытали последнее рассеяние при температурах порядка 3000 К, произошел и отрыв нейтринного компонента, но еще при температурах около 10^{10} К. С этого момента концентрация нейтрино убывала лишь за счет общего космологического расширения, причем теория предсказывает, что сегодня в каждом кубическом сантиметре пространства должно существовать около 150 частиц каждого сорта ν_e , ν_μ , ν_τ .

Даже если мюонные и тау-нейтрино безмассовые, уже электронные нейтрино, обладая массой покоя в 30 эВ, могут по своей плотности примерно в 2 раза превысить критическую плотность материи во Вселенной. Не исключено, что ν_μ и ν_τ тоже массивны, причем их масса покоя практически совпадает с массой покоя электронного нейтрино. Это предположение базируется на данных экспериментов по поиску осцилляций нейтрино.

Еще в конце 50-х годов Б. М. Понтекорво высказал гипотезу о возможном несохранении лептонных чисел, приводящем к эффекту осцилляций нейтрино. Вкратце суть дела состоит в следующем. Подобно тому как в квантовой физике каждому бариону (например, протону или нейтрону) ставится в соответствие барионный заряд, характеризующий способность частицы участвовать в сильном взаимодействии, каждому члену семейства лептонов — электрону и электронному нейтрино, мюону и мюонному нейтрино и т. д. — ставится в соответствие свое квантовое число — лептонный заряд. Считается, что в реакциях взаимопревращения элементарных частиц эти квантовые числа по отдельности сохраняются.

Например, в бета-распаде нейтрона $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ до реакции лептоны отсутствуют и соответствующий заряд

L_e , следовательно, равен нулю. После распада положительный лептонный заряд электрона компенсируется отрицательным зарядом антинейтрино так, что по-прежнему $L_e = 0$. По этой же причине в рассеянии ν_e на электроне не может возникнуть мюонного нейтрино, так как эта реакция идет с сохранением электронного лептонного числа.

А что будет, если сохраняется не каждый лептонный заряд, а только их сумма $L_e + L_\mu + L_\tau$?

В этом случае оказываются возможными процессы превращения нейтрино одного типа в другой. Расчеты показывают, что если осцилляции нейтрино действительно существуют в природе, то пучок электронных нейтрино, выходящий, например, из реактора, на некотором расстоянии будет представлять собой смесь разных типов нейтрино (ν_e , ν_μ и ν_τ).

В последнее время с эффектом осцилляций электронных нейтрино связывают решение одной из острых проблем современной астрофизики — дефицитом солнечных нейтрино в установке Р. Девиса. Солнце, являясь естественным термоядерным реактором, должно создавать значительный поток электронных нейтрино, возникающих в реакциях протон-протонного цикла. Четыре протона превращаются там в ядро ${}^4\text{He}$, а разность энергии покоя ${}^4\text{He}$ и протонов, равная 26,7 МэВ, уносится электромагнитным излучением и нейтрино.

Поскольку внутренние слои звезды непрозрачны для излучения, ясно, что информацию о ее строении могут до нас донести лишь электронные нейтрино. С целью регистрации этих частиц от Солнца в шахте в Южной Дакоте (США) была построена установка, заполненная примерно на 4000 м³ перхлорэтиленом C_2Cl_4 . При взаимодействии солнечного ν_e с хлором возникает изотоп ${}^{37}\text{Ag}$, который после химического разделения мог бы быть обнаружен по своей радиоактивности.

Теория внутреннего строения Солнца предсказывает, что в подобном эксперименте следует ожидать около 7—8 SNU (солнечных нейтринных единиц потока; 1 SNU соответствует одному захвату нейтрино на 10^{36} ядер), в то время как измерения дают в пределе $2,2 \pm 0,4$ SNU. Но если существуют нейтринные осцилляции, то часть ν_e по пути от Солнца к Земле может трансформироваться в иные типы нейтрино, которые неуловимы для установки Девиса. В этом случае массы покоя нейтрино

различных типов оказываются практически одинаковы.

Более того, если подтвердятся данные о массивности электронных нейтрино, то с учетом возможного равенства масс покоя ν_e , ν_μ и ν_τ суммарная плотность всех нейтрино, дошедших до нас от лептонной эры расширения Вселенной, превысит (при $m_\nu = 30$ эВ) критическую плотность материи примерно в 5 раз. При этом, однако, возраст Метагалактики окажется меньше возраста таких старых объектов, как шаровые звездные скопления, и этот результат следует рассматривать, по-видимому, как указание на меньшие значения нейтринной массы покоя (меньше 5 эВ).

Важно, что практически до эпохи, соответствующей красному смещению $z=0,5$, качественная сторона «температурной» истории Вселенной с массивными нейтрино не зависит от изложенных выше деталей (рис. 4). Зная, что в момент отрыва нейтринного газа от электрон-позитронных пар его температура составляла примерно 10^{10} К, нетрудно найти, что при красных смещениях $z=5 \cdot 10^4$ ($m\nu/30$ эВ) фон нерелятивистских нейтрино начнет оказывать определяющее влияние на темп расширения Вселенной и тепловой режим первичного вещества.

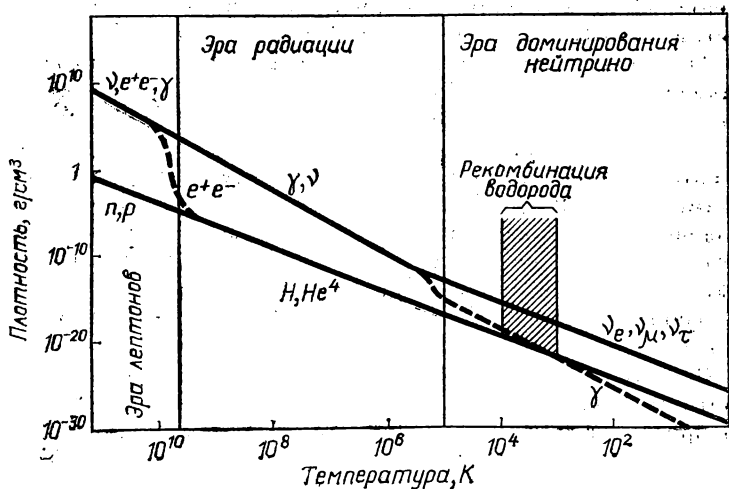


Рис. 4. «Температурная» история Вселенной согласно схеме Большого взрыва с учетом ненулевой массы покоя у нейтрино

При этом эра доминирования радиации сменяется стадией преобладания плотности нейтрино, длящейся вплоть до настоящего времени. Следовательно, массивные нейтрино могут являться носителями скрытой массы во Вселенной. Как это скажется на наших представлениях о ранних стадиях космологического расширения?

После отрыва нейтрино от электронов развитие протогалактических возмущений в каждом из этих компонентов космологической среды шло по своим законам. Газ из нейтрино является, как говорят, бесстолкновительным — нейтрино на этой стадии расширения практически не взаимодействует ни с какими частицами. Если в среде, где доминируют столкновения частиц, возмущения с размерами $R < R_d$ носят характер звуковых волн, затухающих вследствие вязкости и теплопроводности, то в газе нейтрино такие возмущения просто рассасываются из-за их теплового движения. А при $R > R_d$ возмущения в бесстолкновительном газе эволюционируют так же, как в среде со столкновениями.

Если поэтому начальная иррегулярность Вселенной была адиабатического типа, то возмущения в смеси вещества и излучения в малых масштабах затухали вследствие вязкости и теплопроводности среды, в то время как неоднородности в нейтринном газе замыкались в результате теплового движения частиц. Как независимо показали Г. С. Бисноватый-Коган с И. Д. Новиковым и Я. Б. Зельдович с Р. А. Сюняевым, минимальный масштаб выживающих возмущений в нейтрино охватывает массу вещества, близкую к массам скоплений галактик $M = 10^{15}$ ($m_\nu / 30$ эВ) масс Солнца.

После наступления эры доминирования нейтрино возмущения в этой подсистеме вступают в фазу гравитационной неустойчивости, в то время как в барионной жидкости малые неоднородности вплоть до момента рекомбинации водорода осциллируют, подобно звуковым волнам, сохраняя свой первоначальный контраст плотности. В результате к моменту «просветления» плазмы уровень возмущений в нейтринном газе оказывается примерно в 20—30 раз выше, чем в веществе, а, следовательно, начальные возмущения могут быть в 20—30 раз ниже, чем в стандартной модели без скрытой массы. Это, быть может, и объясняет низкий уровень угловых вариаций температуры, характерных для мик-

роволнового космического излучения и формируемых в тот период.

Однако при наличии фона массивных нейтрино у этого типа догалактической неоднородности космологической плазмы происходит радикальная перестройка шкалы характерных масштабов. Если при $m_\nu = 0$ минимальный размер энтропийных возмущений соответствовал массам шаровых скоплений (10^5 — 10^6 масс Солнца), то при $m_\nu \neq 0$ он возрастает вплоть до 10^{15} масс Солнца. При этом уровень угловых вариаций реликтового фона также понижается. Таким образом, в нейтринной Вселенной как адиабатические, так и энтропийные флуктуации плотности космологической плазмы и излучения обладают универсальным характерным масштабом, совпадающим со шкалой скоплений галактик. Угловые же вариации температуры реликтового излучения должны быть ниже порога, который был установлен Ю. Н. Парийским.

Все эти соображения относятся не только к нейтрино, но и к другим типам слабозаимодействующих частиц с ненулевой массой покоя, в том числе и к еще неизвестным науке. Может быть, в этом кроется решение проблемы, если окажется, что все-таки $m_\nu = 0$? Дело в том, что, помимо фона реликтовых частиц, носителями скрытой массы Вселенной могут являться первичные черные дыры, образование которых связывается с самыми ранними этапами расширения Вселенной.

Какие же условия сопровождают образование этих объектов?

Для ответа на этот вопрос придется снова обратиться к модели Большого взрыва и, в частности, еще раз остановиться на проблеме образования структуры Вселенной. Подобно тому как сверхскопления являются типичными представителями крупномасштабной иррегулярности материи, маломассивные черные дыры тесно связаны с догалактической неоднородностью высокотемпературной космологической плазмы. Несмотря на гигантское различие в массах у сверхскоплений галактик и у реликтовых черных дыр, в динамике их образования существует ряд общих закономерностей.

Представим себе, что в некоторой области Вселенной радиуса R плотность материи оказалась несколько выше средней. Каким образом этот избыток отразится на ее динамике? Оказывается, расширение зоны повышен-

ной плотности качественно следует законам расширения Вселенной, в которой гравитация материи доминирует над кинетической энергией ее расширения. В этом случае, очевидно, в ходе расширения зоны с избыточной плотностью наступит момент остановки, и если в этот момент ее размер будет не больше так называемого горизонта частиц (ct), то эта область может сколлапсировать в черную дыру.

Расчеты показывают, что даже если микроскопически малая часть областей повышенной плотности (порядка 10^{-8}) проэволюционирует в черные дыры с массой порядка солнечной, эти объекты могут играть существенную роль в динамике Вселенной при $z < 1000$.

НА ПУТИ К «ВЕЛИКОМУ ОБЪЕДИНЕНИЮ»

Мы изложили основные моменты «температурной» истории ранней Метагалактики, начинающейся с лептонной эры космологического расширения, когда температура плазмы была близка к 10^{12} К и осуществлялось термодинамическое равновесие между электронами и позитронами, мюонами, нейтрино и т. д. Продвигаясь от этого этапа к современному, мы видели, что при температурах порядка 10^8 — 10^9 К во Вселенной синтезировались легкие химические элементы (водород, дейтерий, гелий); при температуре около 3000 К произошло отделение плазмы от излучения и сформировался микроволновый фон электромагнитного излучения; наконец, при температурах порядка 10—30 К должны были появиться первые галактики и скопления.

Таковы в общих чертах предсказания стандартной схемы эволюции Вселенной, охватывающей эры доминирования плотностей лептонов, радиации и вещества (или нейтрино?). Основные законы, управляющие взаимодействием частиц и динамикой расширения мира, на этих этапах нам известны. Без ответа остался вопрос о том, что было до лептонной эры и сколь далеко можно продвинуться в изучении этого периода?

Мы вступаем в малоисследованную область, так как даже самый «реликтовый» из наблюдательных тестов — распространенность легких химических элементов — в лучшем случае подтверждает наши представления, относящиеся самое раннее к середине лептонной эры. Эпоху, предшествующую лептонной, называют адронной.

брой. Это название связано с тем, что при температурах, превышающих 10^{12} К, условие термодинамического равновесия выполняется для элементарных частиц больших масс (адронов), и в равновесии с фотонами соответственно находятся не только лептоны, но и нуклон-антинуклонные пары, короткоживущие гипероны и резонансы.

Если считать, что и здесь расширение Вселенной происходит однородно и изотропно, то конец адронной и начало лептонной эры приходится на время 10^{-6} с после Большого взрыва (вся лептонная эра простирается от 10^{-6} до 10 с после этого события). Свойства Метагалактики в этот период экзотические. В рамках все той же стандартной модели Вселенной нетрудно найти, что плотность материи при температуре около 10^{13} К ($t=10^{-6}$ с) должна была составлять 10^{17} г/см³, что в 1000 раз больше плотности материи, состоящей из одних только атомных ядер.

Как упоминалось ранее, динамика расширения Вселенной определяется плотностью материи и уравнением ее состояния (связью между плотностью и давлением). Нетрудно видеть, что в период адронной эры эта связь зависит от микроскопических свойств взаимодействий элементарных частиц. Таким образом, мы вплотную подошли к вопросу, отмеченному во введении: свойства Вселенной, оказывается, связаны со структурой микромира — «неэлементарными» свойствами элементарных частиц. Что представляла собой космологическая плазма при столь высоких плотностях и энергиях частиц?

Долгое время попытки ответить на этот вопрос сталкивались с отсутствием удовлетворительной теории, описывающей взаимодействие элементарных частиц при высоких плотностях материи. Даже сейчас, когда физика частиц высоких энергий достигла колоссального прогресса в описании свойств «элементарных кирпичиков» — кварков, еще нет полной уверенности в справедливости экстраполяции известных в настоящее время законов их взаимодействия на экстремально плотный этап расширения Вселенной¹⁰. Именно поэтому мы можем говорить лишь о некоторой возможной схеме эво-

¹⁰ В этом смысле представляется чрезвычайно важным недавнее экспериментальное открытие так называемого W^{\pm} -бозона, являющегося переносчиком слабого взаимодействия между кварками и лептонами.

люции сверхплотного вещества, справедливость которой еще предстоит неоднократно проверить.

Эта схема базируется на представлениях о кварковой структуре известных (и неизвестных) в настоящее время частиц, таких, например, как протон, нейтрон, пимезоны и т. д., входящих в семейство сильновзаимодействующих частиц — адронов. Подобно тому как при высоких температурах в лептонную эру расширения Вселенной атомы и молекулы теряли свою индивидуальность и основными объектами были протоны, нейтроны, электроны и т. д., на адронном периоде эволюции Вселенной определяющую роль играют процессы взаимопревращения истинно элементарных частиц — кварков.

В настоящее время считается, что в природе существуют шесть типов кварков: u , d , c , s , b , t , каждый из которых обладает, подобно электрону, спином $1/2$, дробным барионным и электрическим зарядами. Кроме того, каждому кварку становится в соответствие новое квантовое число — «цвет» («красный», «синий» и «желтый»), введение которого необходимо для согласования кварковой структуры адронов с известным принципом Паули, запрещающим существование двух частиц со спином $1/2$ в одинаковых квантовых состояниях.

Взаимодействие между «цветными» кварками осуществляется посредством обмена безмассовыми частицами — глюонами (от английского glue — клей), связывающими их в адронах. В рамках этой схемы протон представляет собой комбинацию двух u -кварков и одного d -кварка; нейтрон имеет состав udd ; π^\pm -мезоны представляют собой связанные состояния $\bar{u}d$ - и $u\bar{d}$ -кварков и т. д., причем комбинация кварков в этих системах приводит к их «бесцветности»¹¹.

Чрезвычайно важно, что теория, описывающая взаимодействие кварков, предсказывает, что по мере роста энергии сталкивающихся частиц их взаимное влияние друг на друга ослабевает. Это свойство кварковой материи послужило поводом, чтобы ввести в физику частиц новое понятие «асимптотическую свободу», означающую, что при больших энергиях кварки чрезвычайно

¹¹ В этом месте имеется в виду аналогия с оптикой — комбинация красного, синего и желтого цветов при наложении дает белый цвет.

слабо взаимодействуют друг с другом. Следовательно, можно ожидать, что в адронную эру расширения Вселенной кварковая плазма будет обладать такими же термодинамическими характеристиками, как и радиационная плазма.

Отсюда, в частности, следует также, что и темп расширения Вселенной в адронную эру должен практически совпадать с темпом расширения в эпоху доминирования радиации. А это дает нам ключ к исследованию основных закономерностей эволюции Вселенной при сверхвысоких температурах плазмы вплоть до температур, превышающих 10^{26} К.

В значительной мере прогресс в понимании этих закономерностей стимулирован появлением так называемых теорий «Великого объединения», предсказывающих, что при температурах больше 10^{26} К электромагнитное, слабое и кварк-глюонное взаимодействия теряют свою индивидуальность. Этот путь объединения различных типов взаимодействий в одно универсальное возможен лишь в том случае, если кварки, из которых построены «тяжелые» частицы, окажутся нестабильны.

Но это автоматически означает и нестабильность протона, являющегося связанным состоянием трех кварков. К счастью, период полураспада протона оказывается фантастически большим даже по астрономическим меркам. Он варьируется в зависимости от конкретного варианта теории, от 10^{28} до 10^{31} лет. И хотя это время почти на 18 порядков превышает современный возраст Метагалактики, тем не менее уже сейчас ставятся эксперименты по обнаружению радиоактивности протонов. Очевидно, что для этого необходимо одновременно рассмотреть поведение примерно 10^{32} частиц, чтобы зарегистрировать хотя бы несколько событий распада.

Подтверждение гипотезы о нестабильности протона автоматически означало бы несохранение барионного заряда во Вселенной. Это уже прямой ответ на вопрос о том, почему же Вселенная является «горячей». В одном из предыдущих разделов мы вводили такую характеристику плазмы, как удельная энтропия излучения на один барион S . Величина S , равная примерно 10^8 — 10^{10} (что фактически очень близко к величине отношения концентрации фотонов к концентрации нуклонов), характеризует число возможных состояний в системе.

Но до сих пор остается непонятным, почему этот

параметр столь велик, или, иначе, почему Вселенная столь «хаотична»?

Оказывается, этот вопрос тесно связан и еще с одной проблемой современной космологии. Речь идет о проблеме доминирования (в настоящее время) плотности числа частиц над античастицами, симметрия свойств которых является одним из фундаментальных свойств микромира. Звезды, галактики и другие объекты космоса состоят из обычного вещества — протонов, нейтронов, ядер тяжелых химических элементов. Наблюдения наглядно доказывают, что во Вселенной не существует сколько-нибудь заметного по плотности фона антивещества — антизвезд, антигалактик и т. д., словом, таких структурных единиц, в которых частицы заменены на античастицы.

Оказывается, причины отсутствия во Вселенной антивещества и причины наличия высокой удельной энтропии излучения одни и те же. Это вызвано нарушением закона сохранения барионного заряда, предсказываемого «Великим объединением». Весьма вероятно, что уже в первые 10^{-36} с космологического расширения распады сверхтяжелых частиц, аналогичные распаду протона, обеспечили малый избыток барионов над антибарионами — примерно одну лишнюю частицу на 100 миллионов. Этот избыток, как показывают расчеты, должен был сохраниться почти в первозданном виде вплоть до современной эпохи.

Естественно, эта упрощенная схема нуждается в детальном развитии. Мы еще раз убеждаемся, насколько тесно переплетаются проблемы микро- и Мегамира. На этом пути, несомненно, уже получены первые фундаментальные результаты, позволяющие в общих чертах наметить направления поисков решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы познакомились с рядом фундаментальных проблем современной космологии, фактически разграничивающих области известного и неизвестного о строении и эволюции Вселенной. Некоторые из них, такие, например, как проблемы возникновения барионной асимметрии Вселенной или высокой удельной энтропии излучения, изменили свой статус буквально в последнее десятилетие. Как мы видели, произошло смешение

«центра тяжести» этих проблем в область физики частиц высоких энергий, переживающей в настоящее время период бурного развития.

Стало понятно, что глобальные свойства Вселенной — крупномасштабная изотропия и однородность, существование галактик и их скоплений и т. д. — могут быть связаны с фундаментальными процессами, разыгрывающимися на микроскопическом уровне строения материи. Однако было бы ошибочным считать, что современная космология является лишь «потребителем» идей квантовой физики частиц. Существует и обратное влияние, которое позволяет делать выбор между различными вариантами теории физики частиц.

Процесс проникновения в глубь микромира чрезвычайно труден. Понадобилось почти 15 лет, чтобы современная ускорительная техника перешагнула порог энергий в 100 ГэВ и подтвердила правильность существующих представлений о динамике слабого взаимодействия частиц, непосредственно зарегистрировав переносчиков этого взаимодействия — W^{\pm} -бозонов.

Правда, по космологическим меркам этот диапазон энергий представляется микроскопическим. Граница, отделяющая нас от процессов, которые, по-видимому, должны были играть решающую роль в формировании «начальных условий» эволюции Вселенной, лежит значительно дальше. Нам не хватает примерно 12 порядков по энергиям частиц, чтобы непосредственно убедиться в справедливости гипотез о причинах преобладания вещества над антивеществом.

Однако даже немислимое с позиций сегодняшнего дня приближение к этому барьеру еще не означает, что с фундаментальными проблемами космологии будет покончено. Перед нами откроется новая область, для которой энергии частиц уже будут сравнимы с так называемой планковской энергией $E_p = 10^{19}$ ГэВ, которая возникает в результате комбинирования трех фундаментальных констант современной физики — постоянной Планка h , скорости света в вакууме c и гравитационной постоянной G .

Случайно ли появление этой размерной величины в современной теории? Не означает ли это, что при столь высоких энергиях частиц уже неправомерно разделение всех взаимодействий на отдельные типы? Наконец, не означает ли это, что вместо ОТО динамика столь экзо-

тического состояния должна описываться более общей теорией — квантовой теорией гравитации?

Этот круг проблем еще ждет своего решения. Но именно на этом пути, по-видимому, кроется разгадка такой «простой» на первый взгляд проблемы, как то, почему Вселенная вообще расширяется и что предшествовало этому состоянию. Естественно, что столь грандиозные энергетические масштабы, отделяющие нас от экстремально плотного этапа расширения мира, заставляют иногда скептически относиться к попыткам «заглянуть» за этот барьер. Но исторический опыт науки, особенно последних десятилетий, убедительно доказывает плодотворность таких, быть может, еще «наивных» попыток.

Колоссальную роль в таком продвижении в понимании прошлого Вселенной играют поиски следов этого прошлого — различного рода реликтов ее горячего состояния. Не исключено, что развитие гравитационно-волновой астрономии позволит «заглянуть» в самое сердце «ядерного котла», которым являлась Вселенная в момент Большого взрыва. Быть может, в скором будущем мы станем свидетелями открытий новых типов элементарных частиц, свойства которых также могут пролить новый свет на прошлое Вселенной.

Нельзя исключить и то, что развитие теории «Великого объединения» отодвинет барьер между «знанием» и «незнанием» к планковским энергиям частиц. Тогда ответы на фундаментальные проблемы космологии следует искать в еще несозданной квантовой теории гравитации. Как видно, на смену одним вопросам приходят другие, решенные проблемы уступают место нерешенным, и этот процесс познания бесконечен.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Клыпин А. А., Сурдин В. Г. Крупномасштабная структура Вселенной. М., Знание, 1981.

Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной. М., Знание, 1975.

Тернер Н. Нейтрино — элементарный носитель астрофизической информации. — В сб.: Современные проблемы астрофизики. М., Знание, 1978.

Чаругин В. М. Космология: теория и наблюдения. М., Знание, 1979.

Чаругин В. М. Реликтовое излучение, М., Знание, 1975.

ЖЕЛАЮЩИМ ЗНАТЬ БОЛЬШЕ

В последние годы в брошюрах нашей серии неоднократно рассматривались проблемы современной космологии. Однако ряд читателей просит более подробно осветить математический аппарат, используемый космологами. Поскольку ознакомление с ним требует некоторой математической подготовки у читателя, мы можем сделать это лишь в приложении.

МОДЕЛЬ ФРИДМАНА И ЕЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ

Космология — это учение о Вселенной как целом, включающее в себя теорию всей охваченной астрономическими наблюдениями области как части Вселенной. Современная космология рассматривает распределение, взаимодействие и движение масс в мировом пространстве, его геометрические свойства, превращения энергии во Вселенной. В настоящее время космология — это теория нестационарной Вселенной, ведущая свое начало от работ А. А. Фридмана (1922—1924 гг.).

В теории Фридмана материя, заполняющая Вселенную, рассматривается как непрерывная среда, обладающая непрерывным полем досветовых скоростей. При этом обычно пользуются так называемой сопутствующей системой отсчета, относительно которой (по определению) среда покоится, и исследуют поведение и свойства пространства этой системы отсчета — так называемого сопутствующего пространства. Линиями времени ($x_i = \text{const}$, $i=1, 2, 3$) сопутствующей системы отсчета служат мировые линии элементов среды. Исследование проводится посредством уравнений поля тяготения, записанных в сопутствующих координатах (без уравнений движения). Такой способ рассмотрения движения возможен потому, что уравнения движения в поле тяготения оказываются следствием эйнштейновых уравнений этого поля. При сопоставлении современной релятивистской космологии с наблюдаемой Вселенной элементом среды (физически бесконечно малым объемом среды) считают объем, содержащий значительное число скоплений галактик.

Современная теория однородной изотропной Вселенной в главных своих чертах создана А. А. Фридманом.

В такой Вселенной можно прежде всего провести пространственные сечения (гиперповерхности $x^0 = \text{const}$) так, чтобы они были всюду ортогональны к линиям времени сопутствующей системы отсчета, (т. е. чтобы $g_{0i} = 0$ ($i = 1, 2, 3$) в уравнениях Эйнштейна. (Уравнения Эйнштейна без так называемого космологического члена имеют вид: $G_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} G/2 = -\kappa T_{\mu\nu}$, где $g_{\mu\nu}$ и $G_{\mu\nu}$ соответственно метрический тензор и свернутый тензор кривизны пространственно-временного континуума, $G = G^{\alpha}_{\alpha}$, $T_{\mu\nu}$ — тензор энергии и импульса, являющийся функцией состояния среды и исчезающий в вакууме, κ — постоянная тяготения Эйнштейна: $\kappa = 8\pi\gamma/c^2$; γ — постоянная тяготения Ньютона, c — фундаментальная скорость, равная скорости света в вакууме.)

Далее можно выбрать координату времени $x^0 = ct$ и пространственные (сопутствующие) координаты $x^1 = r$, $x^2 = \theta$, $x^3 = \varphi$ так, чтобы

$$ds^2 = c^2 dt^2 - \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2/R_0^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right],$$

где ds — элемент интервала, $R = R(t)$, $R_0 = R(t_0)$, t_0 (обычно) — момент наблюдения, $k = 0, \pm 1$. Сопутствующее пространство обладает постоянной (т. е. одинаковой по всем двумерным направлениям и во всех точках) кривизной k/R^2 , зависящей от времени. При $k = +1$ пространство сферическое или эллиптическое (в обоих случаях замкнутое), при $k = 0$ евклидово, при $k = -1$ гиперболическое (в обоих случаях бесконечное). Скорость его относительного расширения или сжатия одинакова во всех точках и по всем направлениям и равна \dot{R}/R , скорость относительного изменения объема каждого его элемента равна $3\dot{R}/R$ (точки означают дифференцирование по времени).

Очевидно, что расстояния между элементами среды изменяются с течением времени пропорционально величине $R(t)$. Величина $(R/R_0)r$ есть так называемое фотометрическое расстояние точки с координатой r от начала координат (фотометрическое расстояние определяется на основании фотометрического закона обратных квадратов по блеску источника света, исправленному за ослабляющее влияние красного смещения). В момент наблюдения это расстояние, естественно, равно r ,

Уравнения Эйнштейна приводят к двум уравнениям:

$$\begin{aligned} 3\ddot{R}/cR &= -\kappa(\rho + 3p/c^2)/2, \\ 3\dot{R}^2/c^2R^2 + 3k/R^2 &= \kappa\rho, \end{aligned}$$

связанным законом энергии и импульса:

$$\rho + 3(\dot{R}/R)(\rho + p/c^2) = 0,$$

где ρ — плотность массы (плотность энергии, включая энергию покоя, деленная на c^2), p — давление. Плотность и давление одинаковы во всех точках пространства.

Указанные уравнения были получены А. А. Фридманом для случаев $k = \pm 1$, $p = 0$ и обобщены на случай $k = 0$ Г. Робертсоном и на случай $p > 0$ Ж. Леметром.

Для решения системы двух уравнений, содержащих три величины (R , ρ , p), нужно задать еще одно соотношение между ними; например, уравнение состояния $\rho = \rho(p)$. Обычно принимают, что

$$0 \leq 3p/c^2 \leq \rho > 0, \quad \frac{dp}{dR} \leq 0.$$

При любом уравнении состояния, удовлетворяющем этим условиям, типы поведения ρ одинаковы и им можно дать простую интерпретацию в терминах нерелятивистской физики. Действует лишь ньютоновское притяжение, ослабевающее с расширением; оно замедляет расширение и ускоряет сжатие. Возможны два типа поведения R : при $k = +1$ замедленное возрастание R от $R = 0$ (сингулярного состояния, т. е. состояния бесконечной плотности и бесконечной скорости относительного изменения объема: $\rho = \infty$, $(\dot{R}/R)^2 = \infty$) до регулярного максимума R с последующим ускоренным сжатием до сингулярного состояния; при $k = 0, -1$ замедленное, но монотонное и неограниченное возрастание R от сингулярного состояния до $R = \infty$ при $t \rightarrow \infty$, либо обратное ему сжатие (модель при $k = 0$ называется моделью Эйнштейна—де Ситтера).

В «ньютоновской» теории однородной изотропной Вселенной уравнения для величины, описывающей зависимость расстояния между любыми двумя элементарными объемами от времени, формально аналогичны уравнениям для $R(t)$ при $p = 0$, и все сказанное раньше о поведении моделей Фридмана с течением времени верно и для моделей «ньютоновских». При этом, однако, ве-

личина, аналогичная k/R^2 , характеризует не кривизну пространства (в «ньютоновской» Вселенной оно евклидово), а лишь полную энергию любого элемента модели: ее знак противоположен знаку k .

Следует сказать, что релятивистская теория Фридмана позволила устранить затруднения, стоявшие перед нерелятивистской космологией. Теория тяготения Эйнштейна свободна от гравитационного парадокса. Она допускает такие типы нестационарных распределений масс в Вселенной, при которых теория тяготения Ньютона недостаточна и для которых не существует определенного состояния статистического или термодинамического равновесия. При этом возможно неограниченное возрастание энтропии без затухания термодинамических процессов или диссипации массы, что позволяет устранить термодинамические затруднения космологии. Красное смещение, вызываемое расширением материи и понижающее поверхностную яркость излучающих объектов, дает новую возможность для устранения фотометрического парадокса.

Применение теории Фридмана ко всей охваченной наблюдениями области означает допущение, что в современную эпоху в большом масштабе распределение скоплений галактик (а также энергии их пекулярных, т. е. неупорядоченных движений) в известной нам части Метагалактики можно считать однородным, а метагалактическое красное смещение изотропным, и что поэтому поведение и свойства этой части Метагалактики в указанную эпоху и в соответствующем масштабе могут быть представлены каким-либо из однородных изотропных моделей, описанных выше. Эта теория приводит к следующей зависимости величины метагалактического красного смещения $\Delta\lambda/\lambda$ от фотометрического расстояния r , исправленного за искажающее влияние красного смещения и приведенного к моменту наблюдения:

$$cz = H_0 r + \frac{1}{2c} (1 + q_0) H_0^2 r^2 + \dots,$$

где $z = \Delta\lambda/\lambda$, $H = \dot{R}/R$, $q = -R\ddot{R}/\dot{R}^2$, а индексом «0» отмечены значения величин в момент наблюдения. H есть скорость относительного увеличения расстояний скоплений галактик, а безразмерная величина q характеризует величину относительного ускорения при данном H .

В качестве индикатора расстояния удаленных скоплений галактик пользуются средней видимой звездной величиной галактик в этом скоплении. Связь между видимой болометрической звездной величиной ($m_{\text{бол}}$) и красным смещением обычно представляют в виде:

$$m_{\text{бол}} = 5 \lg z + 1,086(1 - q_0)z + \dots + \text{const}$$

(в качестве слагаемого в постоянную входит и $-5 \lg H_0$). Иногда (что точнее) к $1 - q_0$ прибавляют величину $-2\mu_0$, характеризующую изменение абсолютной звездной величины галактики с течением времени: $\mu = 0,46 M/H$. Из космологических уравнений Фридмана получаем

$$kc^2/R_0^2 = -(1 + q_0 - \sigma_0 - \epsilon_0) H_0^2,$$

где $\sigma = \kappa \rho c^2 / 2H^2$, $\epsilon = \kappa p / 2H^2$.

Получив из анализа эмпирических данных значение величин q_0 , σ_0 и ϵ_0 , можно определить соответствующий им тип однородной изотропной космологической модели. Используя, сверх того, эмпирическое значение H_0 , можно из указанных уравнений вычислить значения кривизны пространства k/R_0^2 , а также оценить продолжительность расширения T — от его начала до эпохи наблюдения.

Следует сказать, что эмпирические данные внегалактической астрономии недостаточно надежны для прямой проверки уравнений теории однородной изотропной Вселенной. Часть этих данных (например, оценки q_0) получена при некоторых допустимых с современной точки зрения предположениях об эволюции звездного состава галактик (малость величины μ_0). Если же привлечь некоторые другие космогонические данные, то окажется, что оценки продолжительности космологического расширения с трудом сопоставимы с оценками возраста наиболее старых шаровых скоплений звезд.

Все эти неувязки составляют лишь часть затруднений, с которыми встретилась теория однородной изотропной Вселенной, основанная на теории тяготения Эйнштейна. Они заключаются в следующем.

1. Множественность моделей. Во-первых, при любом значении космологической постоянной уравнения Эйнштейна допускают однородные изотропные модели разных типов, различающиеся значением k и характером поведения со временем. Во-вторых, для каждого ти-

та уравнения дают континуум решений. Множественность моделей естественна, если их применяют лишь к ограниченным областям Вселенной. Но модель Вселенной как целого, если такая модель вообще принципиально возможна, должна быть единственной, как единственная и сама Вселенная.

2. Необъясненная эмпирическая связь метagalактических параметров с микрофизическими константами. Именно безразмерные отношения микрофизических (составленных из c , элементарного заряда e и массы электрона m) величин kH и ρ (т. е. $Q_1 = mc^3/e^2H$ и $Q_2 = mc^6/e^6\rho$) в современную эпоху по порядку величины (около 10^{40}) мало отличаются друг от друга и от отношения электростатической и гравитационной сил, действующих между протоном и электроном (т. е. $Q_3 = e^2/\gamma m m_p$, где m_p — масса протона). Следствием этих двух совпадений являются и другие, например близость числа нуклонов в сфере радиуса cH^{-1} ($Q_4 = 4\pi c^3\rho/3m_p H^2$) к Q_1^2 , Q_2^2 , Q_3^2 . Для объяснения указанных совпадений одной лишь теории тяготения, очевидно, недостаточно.

3. Наличие сингулярности в начале расширения. Эта сингулярность в решениях является границей интервала времени, на котором теория применима или имеет смысл, и может указывать, например, на недостаточность теории тяготения Эйнштейна при очень высокой плотности (во всяком случае выше ядерной).

4. Некоторые отклонения в распределении и движении галактик от однородности и изотропии. Обнаружение этих отклонений заставляет оттеснять применение постулатов однородности и изотропии ко все большим, менее исследованным масштабам.

5. Затруднения, связанные с оценками продолжительности космологического расширения и возрастом самых старых шаровых скоплений.

Альтернативные теории, основанные на постулате однородности и изотропии, можно, в общем, разделить на две группы. В одной из них теория тяготения Эйнштейна так или иначе дополнялась или обобщалась. В другой эта теория отбрасывалась (по крайней мере в космологии). Первая группа представлена направлением Эддингтона—Дирака—Иордана. Ко второй группе принадлежат теории Милна и Бонди—Голда. Обе группы смыкаются в теории Хойла.

Эддингтон попытался дать синтез общей теории от-

носительности с квантовой механикой и вычислить все безразмерные константы физики. Его теория претендовала на объяснение не только упомянутых выше числовых совпадений, но и самих значений совпадающих величин. Однако она совершенно не оправдала себя в микрофизике, к которой относилась по своим основам. В космологии она была связана с выбором некоторой модели (так называемой модели Леметра—Эддингтона), которая получалась из уравнений Эйнштейна с так называемой космологической постоянной $\Lambda > 0$. Эта выбранная им однородная изотропная модель противоречила эмпирическим данным о красном смещении галактик.

Дирак предположил, что обсуждаемые числовые совпадения выполняются всегда — в любую эпоху. Он дополнил релятивистскую теорию однородной изотропной Вселенной постулатом, согласно которому любые две очень большие безразмерные величины (например, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4), встречающиеся в природе, связаны простым математическим соотношением, где коэффициентами служат (постоянные) числа порядка единицы. Теория Дирака приводила к выбору единственной модели однородной изотропной Вселенной: $k=0, p=0$.

Важно, что поскольку Q_1 изменяется с течением времени, то величины порядка Q_1 (например, Q_2, Q_3) должны изменяться (с течением времени) пропорционально Q_1 , а величины порядка Q_1^2 (например, Q_4) пропорциональны Q_1^2 . Следовательно, по Дираку, по крайней мере некоторые из физических констант должны зависеть от времени. Дирак выделил две системы масштабов времени и длины (при одинаковых единицах скорости и массы (в обеих системах постоянны c, m, m_p)). В одной из двух систем (идея двух шкал времени была заимствована у Милна) — «атомной шкале времени» — были постоянны еще и e, h , а также отношение γ/H , в другой — «динамической шкале времени» — γ и произведения $e^4 H$ и $h^2 H$. Связь между динамическим временем t^* и атомным временем t можно представить в виде $dt^* = t dt/t_0$, где t_0 соответствует современной (вообще произвольной) эпохе.

Включая далеко идущую произвольную ревизию современной физики, теория Дирака вместе с тем вступала в противоречие с данными космогонии.

В сочетании с идеей замкнутости пространства по-

студат Дирака приводил к предположению, согласно которому число нуклонов (N) в мире возрастает с течением времени. Эта идея, почти с самого начала оставленная Дираком, была использована Иорданом. В основу космологии Иордан положил обобщение общей теории относительности, представляющее собой вариант проективной единой теории поля, в котором место гравитационной постоянной занимает гравитационный инвариант. Уравнения Иордана допускают множество моделей, из которых он выделил однородную изотропную модель с $R \sim t$, $\gamma \sim t^{-1}$, $\rho \sim t^{-1}$, $k = +1$, $p = 0$, $H \sim t^{-1}$, N (а следовательно, и массой) $\sim t^2$.

Наиболее значительные отличия космологической теории Иордана от обычной релятивистской космологии состоят в переменности «константы» тяготения и в постоянном возникновении вещества. Последнее противоречит закону сохранения числа барионов, известны и другие противоречия между теорией Иордана и эмпирическими данными. Иначе говоря, теория Иордана является произвольным построением, не имеющим какого-либо серьезного фактического обоснования.

Направление Эддингтона—Дирака—Иордана представляло собой изменение релятивистской космологии путем некоторого дополнения или обобщения теории тяготения Эйнштейна. Теория Милна отрицала как бы то ни было физико-теоретические основы космологии: в этой теории физика подчинена космологии. Постулат, равносильный предположению об однородности Вселенной (по отношению к сопутствующей системе), выступает здесь не как дополнение к физической теории, специфицирующее выбор космологических моделей, а как «космологический принцип», при помощи которого не только конструируется космологическая модель, но и делается попытка вывода основных физических законов.

Космологическая модель, предложенная Милном, состоит из системы «фундаментальных» частиц («субстрат») и системы «свободных» частиц («статистическая система»). Причем поле тяготения создается и воспринимается лишь частицами статистической системы, т. е. отклонениями в распределении частиц от субстрата. Меру длины Милн определял через меру времени требованием постоянства скорости света c . Он выделил две шкалы времени: в одной из них («кинематической») относительные скорости фундаментальных частиц поло-

жительны и постоянны, в другой («космической») эти скорости равны нулю. Связь между «кинематической» шкалой t и «космической» шкалой τ может быть представлена в виде $\tau = t_0 \ln(t/t_0) + t_0$, причем $t = 0$ или $\tau = -\infty$ есть момент совпадения всех частиц, а t_0 — произвольный данный момент времени.

Каждая из фундаментальных частиц служит центром сгущения частиц статистической системы и с каждой фундаментальной частицей в любой шкале времени можно связать жесткую невращающуюся систему отсчета. В космической шкале все такие системы совпадают, так как пространство этой шкалы сопутствует субстрату. Метрика пространства таких систем предполагается евклидовой в кинематической шкале; тогда в космической шкале метрика пространства таких систем будет гиперболической. Уравнения распространения электромагнитных волн и формулы специальной теории относительности имеют обычный вид в кинематической шкале. Уравнения же динамики и ньютонов закон тяготения имеют вид, наиболее близкий к обычному, в космической шкале.

В настоящее время теория Милна, названная им «кинематической космологией» и «кинематической теорией относительности», не имеет своих сторонников, поскольку не обладает какими-либо преимуществами перед релятивистской космологией, но вызывает затруднения при использовании двух шкал времени*.

В основу теории, предложенной Бонди и Голдом и названной стационарной моделью Вселенной, положен так называемый «совершенный космологический принцип», согласно которому Вселенная (в достаточно большом масштабе) одинакова не только везде, но и всегда. В дополнение к этому принципу вводилось требование изотропии (в сопутствующих координатах). «Совершенный космологический принцип» приводил к евклидовости сопутствующего пространства и к тому, что величина H должна была оставаться постоянной (это означало увеличение метагалактических расстояний со временем по экспоненциальному закону). Падение же средней плотности, по мнению авторов теории, должно ком-

* Существование двух шкал устраняло сильное противоречие между имевшейся тогда оценкой продолжительностью расширения (из-за неверного определения постоянной Хаббла) и возрастом звезд и Земли.

пенсироваться непрерывным «творением» вещества «из ничего».

Подобно «кинематической» теории Милна, рассматриваемая теория лишена какой-либо физико-теоретической основы. Однако теория стационарной Вселенной получила некоторое распространение в связи с ее вариантом, предложенным Хойлом. Он видоизменил уравнения Эйнштейна путем введения аддитивного члена таким образом, чтобы согласовать их с идеей возникновения вещества («творящее поле»). При сделанном Хойлом выборе этого члена выполняется соотношение $8\pi\rho = 3H^2$. Поэтому теория Хойла примыкает не только к теории Бонди—Голда, но и к теории Иордана. Однако подобно всем ускоренно расширяющимся моделям Вселенной, она находится в противоречии с современными эмпирическими данными внегалактической астрономии.

Открытие реликтового излучения и другие эмпирические данные утвердили стандартную космологическую модель, о которой рассказывалось в этой брошюре. Ряд оставшихся затруднений привели к некоторым ее альтернативным вариантам, связанным с отказом от принципа однородности и изотропии и с привлечением аппарата квантования гравитационного поля (для ранних этапов космологического расширения). Однако релятивистская теория анизотропной Вселенной еще делает свои первые шаги, и рассказ об этом требует отдельного приложения.

А. Л. ЗЕЛЬМАНОВ,

доктор физико-математических наук

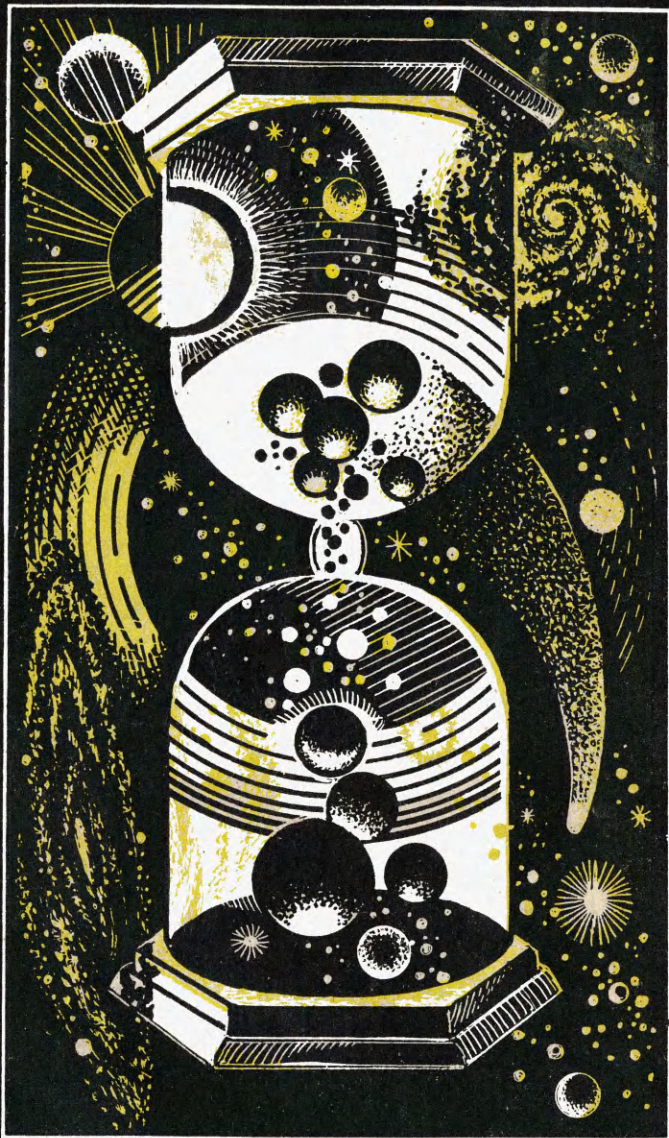
**Леонид Самойлович Марочник,
Павел Давидович Насельский**

ВСЕЛЕННАЯ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Главный отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Мл. редактор *Г. И. Валюженич*. Обложка художника *А. А. Астрецова*. Худож. редактор *М. А. Гусева*. Техн. редактор *Н. В. Лбова*. Корректор *В. В. Каночкина*.

ИБ № 5430

Сдано в набор 20.05.83. Подписано к печати 14.07.83. Т-11624. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отг. 3,57. Уч.-изд. л. 3,52. Тираж 28 130 экз. Заказ 957. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834208. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ**