ОБЗОР

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

УДК 52.551

СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ: ФАКТЫ И ИДЕИ

А. М. Черепащук, А. Д. Чернин

(*ГАИШ*)

E-mail: cher@sai.msu.ru

Дается краткий обзор основных наблюдательных фактов и ключевых идей современной космологии. Подчеркивается, что космология наших дней — это фундаментальная наука об эволюции Вселенной, строящаяся на основе проверенных эмпирических данных и надежной физической теории.

Введение

Космология — особая наука. Ее предмет — вся Вселенная, рассматриваемая как единое целое. Вселенная представляет собой физическую систему со своими специфическими свойствами, которые не сводятся к сумме свойств населяющих ее астрономических тел и физических полей. Это, очевидно, самый большой по масштабу объект науки. Он существует в природе в единственном экземпляре. Из этих обстоятельств и вытекают особенности космологии как науки. Кроме того, Вселенную можно только наблюдать, экспериментировать с нею невозможно (что, конечно, только к лучшему). Никаких других вселенных нам не дано, и сравнивать нашу Вселенную не с чем. Этим космология отличается, например, от физики элементарных частиц, которая изучает объекты, имеющиеся в природе в очень большом количестве и допускающие над собой разнообразное экспериментирование.

Еще одна особенность науки о Вселенной — близкое родство с философскими идеями и исканиями, стремлением осмыслить место человека в большом мире. Как некогда система мира Коперника, новейшая космология открывает перед человеком невиданные ранее горизонты знаний, и неудивительно, что научные знания о мире расходятся с древними космологическими легендами и мифами, возникшими на заре человеческой цивилизации и вошедшими, в частности, в «священные тексты» различных религий мира.

Во всем остальном космология — это строгая научная дисциплина, и главное в ней — конкретные факты о структуре и эволюции Вселенной. На их основе строятся физико-математические модели и теории, которые могут считаться правильными только тогда, когда они проверены и подтверждены прямыми астрономическими наблюдениями и физическими экспериментами.

В этом кратком обзоре мы расскажем об истории и новейших достижениях космологии, о ее текущих проблемах и идеях. Наша цель — дать представление читателю о нынешнем статусе космологии как точной, эмпирической, наблюдательной науки. Это кажется тем более уместным, что в последнее время (а недавно и в стенах Московского университета) предпринимаются попытки бросить тень на эволюционную космологию, а также и на эволюционную теорию в биологии и теорию эволюции звезд в астрофизике, на том основании, что эти науки предполагают атеистический, якобы предвзятый, а потому необъективный и ложный подход к изучению природы и человека. Такие нападки на эволюционную картину мира — одно из абсурдных и нелепых проявлений нарастающей агрессивной клерикальной атаки на науку и образование, об опасности которой предупреждает опубликованное недавно в прессе заявление десяти российских академиков.

1. Краткая история космологии

Современная космология берет начало в первые десятилетия XX в., в ту эпоху, когда были созданы также теория относительности и квантовая теория, составляющие ныне фундамент всей физики, включая и космологию. История космологии, если говорить коротко, складывается из четырех крупнейших наблюдательных открытий, о которых мы сейчас расскажем.

1.1. Космологическое расширение

В 1915–1917 гг. американский астроном Весто Слайфер обнаружил, что галактики (которые тогда называли туманностями) не стоят на месте, а движутся в пространстве, причем большинство из них удаляются от нас. Этот вывод вытекал из наблюдаемых спектров галактик, и их движение проявляло себя в сдвиге спектральных линий света к красному концу спектра. Такого рода «красное

смещение» имеет, как впоследствии оказалось, всеобщий характер: оно наблюдается у всех галактик во Вселенной. Исключение составляют только самые близкие к нам звездные системы — например, знаменитая туманность Андромеды и другие (менее крупные) галактики, находящиеся от нас на расстояниях, не превышающих примерно 1 мегапарсек (Мпк).(Напомним, что один парсек почти точно равен трем световым годам.) На больших расстояниях все галактики, по словам Слайфера, «разбегаются в пространстве».

Количественной мерой красного смещения служит относительная величина увеличения длины волны, т. е. разность зарегистрированной и исходной («лабораторной») длины волны, деленной на исходную длину волны: $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{reg}} - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}}$. Эту величину (ее обычно обозначают буквой z) называют просто красным смещением, — как и само явление. Это одна из основных наблюдаемых физических величин в космологии. Если значение красного смещения мало по сравнению с единицей, то справедливо приближенное соотношение между скоростью удаления галактики и величиной красного смещения: скорость V равна скорости света c, умноженной на красное смещение z. В этом приближении красное смещение можно интерпретировать как эффект Доплера, давно известный в физике.

В 1929 г. Эдвин Хаббл, которого нередко называют величайшим астрономом XX века, установил, что движение разбегающихся галактик следует простому закону: скорость V удаления от нас данной галактики пропорциональна расстоянию R до нее: $V = HR$. Это линейное соотношение между скоростью и расстоянием называют сейчас законом Хаббла, а коэффициент пропорциональности H — постоянной Хаббла (рис. 1). Величина H постоянна в том смысле, что она одинакова для всех галактик и не зависит ни от расстояния до галактики, ни от направления на нее на небе. По современным наблюдательным данным, значение постоянной Хаббла лежит в пределах от 60 до 75 км в секунду на мегапарсек.

Удаление галактик по закону Хаббла наблюдают сейчас до расстояний в нескольких тысяч Мпк. О всеобщем разбегании галактик говорят как о расширении Вселенной, или космологическом расширении. Это самый грандиозный по пространственно-временному масштабу эволюционный феномен природы. Подробнее об истории его открытия и изучения можно узнать из книги [1].

Первоначально закон Хаббла был найден на расстояниях, не превосходящих 20 Мпк, причем и у Слайфера, и у Хаббла измеренные скорости удаления галактик были меньше сотой доли скорости света. В этом случае можно пользоваться приведенным выше приближенным соотношением между скоростью удаления галактик и красным смещением — этим в действительности и пользовался

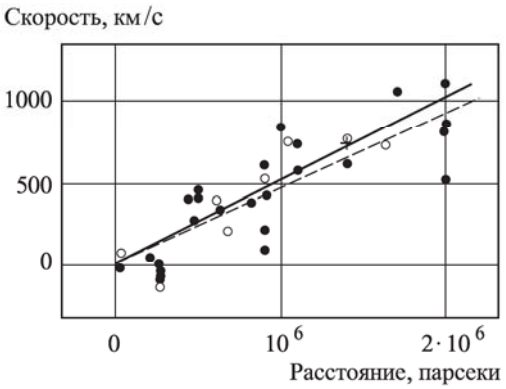

Рис. 1. Диаграмма скорость–расстояние, построенная Э. Хабблом в 1929 г. Расстояния в действительности почти в 10 раз больше, чем считал тогда Хаббл

Хаббл для измерения скоростей галактик. С другой стороны, закон Хаббла можно использовать для оценки расстояний до не слишком далеких галактик: при известной постоянной Хаббла H и измеренном красном смещении z расстояние R до данной галактики дается отношением cz/H.

Но при красных смещениях, сравнимых с единицей и превышающих ее, это приближение уже неприменимо и нужно пользоваться точной теорией распространения света в расширяющейся Вселенной. При этом зависимость расстояния от красного смещения принимает более сложный вид. Особенно интересно, что в эту зависимость входит ускорение, испытываемое разбегающимися галактиками. Отсюда возникает возможность измерить ускорение, с которым движутся галактики; а зная ускорение, можно оценить и силу, которая определяет динамику космологического расширения (см. разд. 1.4). Распространение света в космологии рассматривается на основе общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейна.

Л. Д. Ландау называл ОТО самой красивой теорией физики и никогда не сомневался в ее правильности. Эта теория, созданная Эйнштейном в 1915–1917 гг., стала релятивистским обобщением ньютоновской теории тяготения и стала основой, на которой строится вся современная космология. И все же иногда говорят, что применимость ОТО к описанию геометрии и динамики Вселенной как целого еще не доказана. При этом чаще всего ссылаются на то, что ОТО проверена экспериментально значительно менее надежно, менее точно и многогранно, чем, скажем, классическая электродинамика, — отчасти из-за исключительной слабости гравитационного взаимодействия в сравнении с электромагнитным и двумя другими фундаментальными физическими взаимодействиями.

Но все развитие физической науки определенно свидетельствует в пользу ОТО. Прежде всего эта теория прекрасно согласуется со всем комплек-

сом наблюдательных данных о Солнечной системе. В этом случае ОТО уже давно стала почти инженерной наукой: современная теория движения планет является релятивистской теорией, в которой (в нужном приближении) учитываются эффекты слабого поля в ОТО. Так что полеты космических аппаратов к планетам Солнечной системы немыслимы без ОТО. Даже портативные автомобильные навигаторы GPS и ГЛОНАСС действуют с учетом эффектов ОТО. Далее, в последние годы получены новые данные, свидетельствующие о справедливости ОТО в приближении сильного поля. Например, показано, что наблюдаемое укорочение орбитального периода радиопульсара в двойной системе PSR 1913 + 16, обусловленное потерей углового момента двойной системой за счет гравитационных волн, согласуется с предсказанием ОТО с точностью лучше 0.4%. Измеренная величина эффекта Шапиро (задержка электромагнитного сигнала в гравитационном поле) в системе из двух радиопульсаров PSR J0737-3039AB, плоскость орбиты которой лежит почти на луче зрения, согласуется с предсказанием ОТО с точностью 0.1%! К настоящему времени это служит наилучшей проверкой ОТО в пределе сильного поля. В 2008 г. в этой системе из двух радиопульсаров обнаружена релятивистская прецессия оси вращения нейтронной звезды в полном согласии с ОТО. Наконец, стоит упомянуть и тот факт, что сейчас известно около тысячи кандидатов в черные дыры с массами от 10 до миллиарда солнечных масс, все наблюдаемые свойства которых чрезвычайно похожи на свойства черных дыр, предсказываемые ОТО, и ни в одном случае из этого огромного числа объектов не удалось найти никаких противоречий с ОТО. Это позволяет обоснованно предполагать, что ОТО справедлива и в пределе экстремально сильных полей тяготения.

Таким образом, нет никаких реальных оснований сомневаться в правомерности применимости ОТО для решения космологических задач.

1.2. Темная материя

В 1932 г. немецкий астроном Фриц Цвикки заметил, что кроме светящегося вещества галактик во Вселенной должны иметься еще и невидимые «скрытые» массы, которые проявляют себя только своим тяготением. Он изучал скопление галактик в созвездии Волосы Вероники — крупное образование, содержащее тысячи звездных систем, подобных Туманности Андромеды или нашей Галактике. Галактики движутся в этом скоплении со скоростями, достигающими тысячи километров в секунду. Чтобы удержать их в объеме скопления, требуется тяготение, которое не способны создать одни только видимые, светящиеся массы самих галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и, согласно подсчетам Цвикки, тут нужны дополнительные массы, которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы галактик скопления.

Позднее, в 1970-е гг., усилиями астрономов СССР и США было обнаружено, что скрытые массы должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в изолированных крупных галактиках. Я. Эйнасто, В. Рубин, Дж. Острайкер, Дж. Пиблс и их коллеги выяснили, что скрытые массы образуют невидимые гало крупных галактик. Эти гало — почти сферические образования, радиусы которых в 5–10 раз превышают размеры самих звездных систем (рис. 2). Такая крупная галактика, как, скажем, Туманность Андромеды или наша Галактика, состоит из звездной системы, погруженной в распределение невидимой массы, которое простирается на расстояния до сотни килопарсек (кпк) от центра галактики. Эти темные гало — как и дополнительные массы у Цвикки — проявляют себя только своим тяготением. Невидимое вещество, наполняющее гало галактик и скоплений, принято сейчас называть темной материей. Открытие темной материи — второе (после открытия космологического расширения) важнейшее событие в истории космологии.

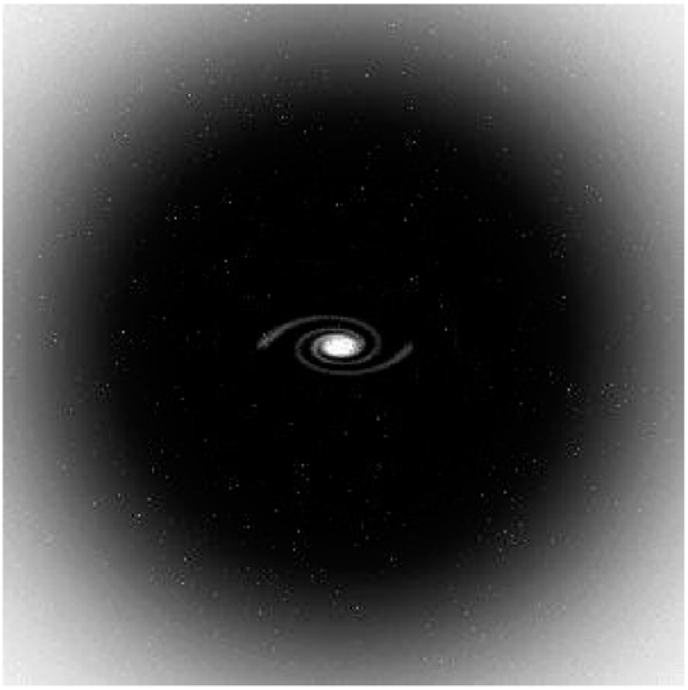

Рис. 2. Спиральная галактика и ее темное гало, которое в несколько раз протяженнее галактики

1.3. Реликтовое излучение

В 1965 г. А. Пензиас и Р. Вилсон обнаружили, что вся Вселенная пронизана излучением, приходящим к нам изотропно, т. е. равномерно из всех направлений. Это третье из крупнейших открытий в космологии (о нем подробно рассказано в книге [2]). Максимум в спектре этого излучения приходится на миллиметровые волны, причем сам спектр,

т. е. распределение излучения по длинам волн или частотам, совпадает по форме со спектром абсолютно черного тела. Положение максимума в спектре излучения отвечает температуре около трех градусов абсолютной шкалы. В современных наблюдениях эта температура измеряется исключительно точно: $T = 2.725 \pm 0.003$ К. Это излучение называют микроволновым фоном Вселенной, или еще реликтовым излучением. Если говорить о нем на языке квантов, то можно сказать, что в мире имеется равновесный газ фотонов, равномерно заполняющих все пространство. В каждом кубическом сантиметре Вселенной содержится примерно 500 реликтовых фотонов.

Это открытие было отмечено двумя Нобелевскими премиями. Первая присуждена в 1978 г. Пензиасу и Вилсону, а вторая — в 2006 г. Дж. Смуту и Дж. Матеру, которые дали точное доказательство (в 1992 г.) того, что спектр излучения действительно является «чернотельным» (рис. 3). Это было сделано с помощью американского спутника COBE (COsmic Background Explorer). Кроме того, COBE измерил слабую — на уровне тысячных долей процента — анизотропию фонового излучения. Последняя представляет собой «отпечаток» первоначально слабых неоднородностей вещества ранней Вселенной, которые позднее дали начало наблюдаемым крупномасштабным космическим структурам — галактикам и скоплениям галактик (см. об этом в книге [3]).

Заметим, что космическое фоновое излучение регистрировалось еще в 1957 г. в Пулковской обсерватории с помощью антенны, построенной Т. А. Шмаоновым, С. Э. Хайкиным и Н. Л. Кайдановским. Но, увы, никто тогда не придал этому значения. Слабую анизотропию излучения первыми заметили И. А. Струков и его сотрудники (Институт космических исследований РАН) с помощью российского космического аппарата Реликт. От ГАИШ МГУ в этом эксперименте принимал участие доктор физико-математических наук, профессор М. В. Сажин.

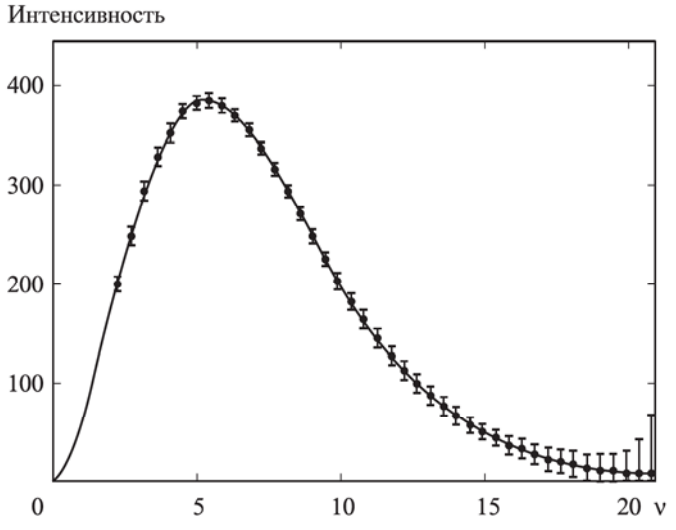

Рис. 3. Спектр реликтового излучения: зависимость интенсивности излучения от частоты. Здесь интенсивность измеряется в единицах «мегаянский на стерадиан», как это принято у радиоастрономов [1 янский $= 10^{-26}$ Вт/(м^2·Гц)]; частота измеряется в обратных сантиметрах. Ошибки измерений столь малы, что изображающие их на рисунке «усы» увеличены в 400(!) раз, чтобы их можно было разглядеть

1.4. Темная энергия

В 1998–1999 гг. две международные группы наблюдателей, одной из которых руководили Б. Смидт и А. Райсс, а другой С. Перлматтер, установили, что наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением: скорости удаления галактик возрастают со временем (об этом подробнее рассказывается, например, в книгах [4, 5] и недавнем обзоре [6]). Открытие сделано с помощью изучения далеких вспышек сверхновых звезд определенного типа (Ia), которые замечательны тем, что они могут служить «стандартными свечами», т. е. источниками с известной собственной светимостью; на это их свойство обратил внимание еще много лет назад астроном ГАИШ профессор Ю. П. Псковский. Из-за их исключительной яркости сверхновые можно наблюдать на очень больших, истинно космологических расстояниях, составляющих тысячи мегапарсек от нас. Как мы уже говорили выше, именно на этих расстояниях и проявляется эффект ускорения.

«Обычное» вещество не способно ускорять галактики, а лишь тормозит их разлет: взаимное тяготение галактик стремится сблизить их друг с другом. Поэтому открытый астрономами факт ускоренного расширения указывает на то, что наряду с обычным веществом, создающим тяготение, во Вселенной присутствует и неизвестная ранее ни по астрономическим наблюдениям, ни по физическим экспериментам особая космическая энергия, которая создает не тяготение, а антитяготение — всеобщее отталкивание тел природы. При этом в космологическом масштабе антитяготение сильнее тяготения. Новая энергия получила название «темной энергии». Темная энергия действительно невидима — она не излучает, не рассеивает и не поглощает света (и всех вообще электромагнитных волн); она проявляет себя только своим антитяготением.

По совокупности различных наблюдений к настоящему времени установлена доля каждого космического компонента в общем энергетическом балансе современной Вселенной. Эти компоненты сейчас называют видами космической энергии. На долю темной энергии приходится примерно 75% всей энергии мира; на долю темной материи — 20%, на долю обычного вещества (его принято называть барионами) — около 5%; на долю излучения —

меньше десятой доли процента. Таков рецепт «энергетической смеси», заполняющей современную Вселенную.

Замечательно, что три из четырех фундаментальных открытий в космологии, о которых мы рассказали сейчас, были первоначально предсказаны теоретически. Феномен космологического расширения предвидел в 1922–1924 гг. петербургский математик А. А. Фридман, ставший в наши дни общепризнанным классиком науки о Вселенной (о его трудах и жизни см. в книге [7]). Существование фонового электромагнитного излучения с температурой в несколько градусов Кельвина предсказал в 1948–1953 гг. Г. А. Гамов, некогда ученик профессора Фридмана по Петербургскому (Ленинградскому) университету. Согласно построенной Гамовым теории Большого Взрыва (см. снова [2]), это излучение представляет собой остаток, реликт некогда очень горячего начального состояния Вселенной, имевшего место в первые минуты ее расширения. Что касается космического антитяготения, то представление о нем содержалось в работе Эйнштейна (1917), положившей начало современной космологической теории. И только темная материя не была предсказана теоретически — этот тип вещества, или энергии, не предусмотрен стандартной моделью фундаментальной физики.

2. Реальность Большого Взрыва: космическая эволюция

В космологической литературе (весьма обширной и разнообразной на сегодняшний день) словам «Большой Взрыв» не всегда придают один и тот же смысл. Иногда под этим понимают гипотетическое событие, в результате которого возникла Вселенная и началась ее дальнейшая история. Не вполне ясно, впрочем, обязательно ли в этом случае говорить именно о возникновении мира «из ничего» или скорее, может быть, о каком-то его новом возрождении из чего-то уже некогда существовавшего. Как бы то ни было, о физике, которая стоит за этим событием, в настоящее время ничего достоверно не известно. По этому поводу вспоминают, случается, о мифе божественного сотворения мира, о древних космогонических легендах народов мира. Но, как говорил знаменитый космолог Жорж Леметр (а он был также профессиональным теологом, аббатом и президентом Папской академии наук в Ватикане), космологическая теория, допускающая особое, сингулярное начальное состояние мира, «остается полностью в стороне от любых метафизических или религиозных вопросов. Она оставляет материалисту свободу отрицать любое трансцендентное Бытие. Для человека верующего это отводит любую попытку более близкого знакомства с Богом... что созвучно с изречением Исайи, гласящим о «Скрытом Боге», скрытом даже в начале творения». Но такую просвещенную точку зрения разделяют, приходится сказать, далеко не все последователи тех или иных религиозных верований. Известны как многочисленные — наивные и безнадежные — попытки отрицать Большой Взрыв, так и тщетные усилия увидеть в Большом Взрыве «научный аргумент» в пользу божественного творения мира.

Чаще всего в физике и астрономии Большим Взрывом называют, однако, не начальное событие космической истории, а весь разворачивающийся в пространстве-времени процесс всеобщего расширения Вселенной. Этот процесс сопровождается длительной и богатой событиями космологической эволюцией, непрерывной цепью изменений и превращений во Вселенной. Заметим, что ключевое слово здесь — «эволюция», столь нелюбимое клерикальными критиками космологии, неразумно отвергающими в этой науке (как и в биологии) все, что, по их мнению, противоречит религиозному мировоззрению. Между тем выяснение и надежное доказательство основных черт и этапов эволюционного развития Вселенной — одно из важнейших достижений современного естествознания. Приведем сейчас ряд конкретных наблюдательных фактов эволюционной истории Вселенной.

2.1. Разбегание галактик

Важнейшим из всех этих фактов является, конечно, сам феномен космологического расширения. Мы уже успели сказать, что космологическое расширение было открыто по наблюдениям движений галактик почти сто лет назад. Это открытие выдержало проверку временем, причем за истекшие с тех пор годы были сделаны необходимые поправки и уточнения к описанию количественных закономерностей этого явления. Не обошлось, однако, и без попыток опровергнуть сам факт космологического расширения. Утверждалось, например, что эффект Доплера (к которому сводится описание красного смещения в области применимости закона Хаббла) экспериментально проверен лишь в ограниченных пространственных масштабах и, возможно, не справедлив на больших космологических расстояниях. Одно время и сам Хаббл, открыватель космологического расширения, склонялся к той точке зрения, что дело не в эффекте Доплера, а в «старении света» по его дороге от галактик до нас. По словам одного из его современников, это выглядело так, как если бы сэр Исаак Ньютон явился и сказал: «Кстати, джентльмены, о том яблоке... Видите ли, оно в действительности не падает».

Идея старения света целиком противоречит общим законам физики — это было строго доказано еще в 1930-е годы. Как мы уже говорили, свет распространяется вдоль нулевых геодезических линий в пространстве-времени, а эффект Доплера (в приближении сравнительно малых скоростей) и красное смещение — прямые следствия этого

фундаментального общего обстоятельства. Справедливость стандартной теории распространения света проверена и подтверждена всей совокупностью многочисленных экспериментов и астрономических наблюдений — в том числе и на космологических расстояниях. Как видно, например, из знаменитой «Теории поля» Ландау и Лифшица, картина распространения света в космологии проста и естественна; никаким сомнениям тут нет и не может быть места.

2.2. Наблюдая прошлое Вселенной

Общая картина распространения света позволяет выяснить, при каких условиях в расширяющемся мире можно измерять не только скорости, но и ускорения галактик: как мы уже сказали, тут нужны очень большие расстояния. Таким путем было найдено, что до расстояний примерно в 7 млрд световых лет эти ускорения положительны: скорость удаления галактик возрастает со временем. Но на еще более далеких расстояниях ускорение, как оказалось, меняет знак — там оно отрицательно, и, значит, на этих сверхбольших расстояниях космологическое расширение происходит с замедлением.

Примем теперь во внимание, что свет распространяется в пространстве не мгновенно, не бесконечно быстро, а с некоторой конечной скоростью. Это означает, что мы видим предметы такими, какими они были тогда, когда они испустили принимаемый нами сейчас свет. Солнце мы видим с задержкой в 8 минут; галактики же, находящиеся на расстоянии 7 млрд световых лет, мы видим такими, какими они были 7 млрд лет назад. Телескоп — это настоящая машина времени, позволяющая воочию видеть прошлое мира. Можно сказать, что, наблюдая далекие галактики, мы видим и исследуем не только пространство, но и время — точнее, четырехмерное пространство-время.

Современный возраст мира составляет 13.7 млрд лет: таковы самые свежие (и самые точные) космологические данные на этот счет, вытекающие из комбинации различных независимых наблюдений. Эта величина — самая большая длительность, эмпирически оцениваемая в природе. Сказанное только что о космологическом ускорении означает, что Вселенная расширялась с замедлением, когда ее возраст не превышал 7 млрд лет. А следующие примерно 7 млрд лет расширение происходило с ускорением. Так стала известна важнейшая веха в динамической истории Вселенной — момент смены знака космологического ускорения. Этот момент делит историю мира на две почти в точности равные части.

В первую половину своей истории расширяющаяся Вселенная практически не чувствовала присутствия в ней темной энергии — тогда плотность вещества (темной материи и барионов) была значительно выше плотности темной энергии. Дело в том,

Рис. 4. Две плотности как функции времени в расширяющемся мире. Плотность темной энергии (горизонтальная прямая) не меняется при расширении, а плотность вещества (темная материя и барионы) убывает из-за расширения

что плотность темной энергии не зависит от времени, это величина постоянная. А плотность вещества убывает в ходе расширения, так что в прошлом она была выше, чем сейчас (рис. 4), и по этой причине до определенного момента тяготение вещества было сильнее антитяготения темной энергии. Эти две силы как раз и сравнялись по величине 7 млрд лет тому назад: сначала преобладало вещество, и его тяготение замедляло разлет галактик, а потом наступила эпоха преобладания темной энергии и ее антитяготения, которое стало ускорять этот разлет.

Предельные расстояния, которые достижимы с помощью лучших современных астрономических инструментов, составляют примерно 10 млрд световых лет — на таких расстояниях видят самые яркие галактики и квазары. Так что космическая эволюция на протяжении последних 10 млрд лет жизни Вселенной доступна теперь прямому наблюдению и детальному изучению. Это две трети всей истории Большого Взрыва, и они разворачиваются, можно сказать, прямо у нас перед глазами. Астрономы планируют создание сложных и дорогостоящих космических и наземных инструментов (в частности, гигантского оптического наземного телескопа с зеркалом диаметром 42 м), которые позволят наблюдать Вселенную в том состоянии, когда ее возраст был меньше одного миллиарда лет, т. е. прямым наблюдениям будет доступно больше 90% всей ее истории.

2.3. Горячее начало

Галактики существовали во Вселенной не всегда; они на 1–2 млрд лет моложе ее. В первые 1–2 млрд лет космическое вещество было равномерно перемешано и однородно распределено в пространстве; никаких космических структур в то время не было, они еще не успели сформироваться. Плотность вещества была тогда гораздо выше, чем средняя плотность вещества в нынешней Вселенной и даже плотность внутри современных галактик. Можно ли увидеть Вселенную в том раннем ее состоянии, когда в ней не было галактик? Да, это возможно: для этого нужно изучать реликтовое излучение.

Предположим (вслед за Гамовым), что вещество ранней Вселенной было не только плотным, но и горячим. Тогда в космическом веществе должно было существовать термодинамически равновесное электромагнитное излучение, которое сохраняется потом и до современной эпохи. Но если ранняя Вселенная была холодной и вещество имело в те времена нулевую температуру, то такого излучения быть не должно. Так возникает ясный тест типа «да–нет» для решения вопроса о температуре ранней Вселенной. Ответ «да — излучение существует», полученный в наблюдениях (см. выше), полностью решает вопрос: ранняя Вселенная была горячей.

При высокой температуре вещества в ранней Вселенной космическое вещество было ионизовано и среда представляла собой плазму. Излучение эффективно взаимодействовало с плазмой и было с ней в термодинамическом равновесии. Но среда охлаждалась из-за космологического расширения, и как только температура упала ниже значения примерно 3000 K, произошла рекомбинация плазмы: электроны соединились с ионами и плазма превратилась в газ нейтральных атомов. Это произошло при возрасте мира 330 тыс. лет. Тогда фотоны космического излучения перестали взаимодействовать с веществом и распространялись с тех пор свободно. Они сохранили и донесли до нас картину «стенки последнего рассеяния», как об этом говорят радиоастрономы.

Какова же эта картина? Результат наблюдений состоит в том, что реликтовые фотоны приходят к нам изотропно, равномерно из всех направлений в пространстве. Поэтому даваемая ими картина проста и однообразна: это сплошной фон, на котором почти ничего не нарисовано. Казалось бы, картина бедновата информацией. Однако из самого этого факта немедленно вытекает вывод большой важности: вещество ранней Вселенной действительно было распределено однородно (или почти строго однородно — с точностью до тысячных долей процента) в эпоху последнего рассеяния фотонов. Согласно общей теории относительности, пространство, однородно заполненное веществом, и само должно быть однородным. Таким путем мы узнаем о пространственной геометрии ранней Вселенной. Изотропия реликтового фона усиливает это заключение: пространство должно быть не только однородным, но и изотропным — все направления в нем равноправны. Такое пространство обладает максимальной симметрией: оно не меняется и выглядит одним и тем же при любых сдвигах и поворотах.

Таким образом, с помощью реликтового излучения строго фиксируется физическое состояние мира и его геометрические симметрии в раннюю эпоху, когда в нем еще не успели образоваться галактики. И это далеко не все из того, что способно сообщить нам реликтовое излучение.

2.4. Пространство Большого Взрыва

Наблюдения реликтового фона позволили в самые последние годы приблизиться к решению одного из фундаментальных вопросов космологии — вопроса о геометрии трехмерного изотропного пространства, в котором происходит разбегание галактик. Со времен Эйнштейна и Фридмана известно, что изотропное пространство может быть в принципе как эвклидовым (плоским), так и искривленным, подобным поверхности сферы или гиперболоида (пространство Лобачевского). Какой из этих трех типов геометрии реализуется в природе?

Детальное изучение тонкой структуры реликтового излучения, начатое космическими аппаратами Реликт и COBE, а затем успешно продолженное в последние годы аппаратом WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), позволило установить, что на равномерном реликтовом фоне имеется в действительности определенный «пятнистый» рисунок: это слабые — на уровне тысячных долей процента — отклонения от идеальной однородности фона. Как мы уже упомянули выше, эти отклонения представляют собой «отпечаток» слабых неоднородностей — сжатий и разрежений космической среды, которые позднее дали начало галактикам и их системам. В сжатиях температура излучения слегка выше средней — это дает яркие (относительно среднего фона) пятна, а в разрежениях — слегка ниже, и здесь возникают относительно темные пятна. При этом степень отклонения от фона различна от пятна к пятну и среди ярких, и среди темных пятен. В этой сложной картине запечатлены (закодированы, можно сказать) важнейшие физические характеристики как самих протогалактических неоднородностей, так и всей Вселенной. Задача исследователей состоит в том, чтобы извлечь и осмыслить богатую космологическую информацию, которую несет нам реликтовое излучение. Для этой цели используются данные о всей совокупности пятен различной яркости и углового масштаба.

Особенно интересны самые яркие пятна на картине реликтового фона. Двум таким соседним пятнам соответствуют два протогалактические сгуще-

ния, которые в эпоху рекомбинации космической плазмы располагались на вполне определенном характерном расстоянии друг от друга. Теория образования галактик, основанная на классической работе Е. М. Лифшица [13](опубликованной еще в 1946 г.), говорит о том, что это характерное расстояние есть возраст мира в эпоху рекомбинации, умноженный на скорость света; этот возраст известен — 330 тыс. лет (см. разд. 2.3). Линейному расстоянию между двумя сгущениями соответствует определенный угол между направлениями в пространстве на два соответствующих ярких пятна. При этом соотношение между угловым и линейным расстояниями зависит от того, какова геометрия пространства: в сферическом пространстве интересующий нас угол составляет полтора градуса, в гиперболическом — половину градуса, в плоском — один градус.

В наблюдениях было обнаружено, что характерное угловое расстояние между соседними яркими пятнами равно одному градусу (с точностью до 2%). Это означает, что пространство, в котором происходит космологическое расширение, является плоским. Или во всяком случае практически плоским, очень близким к плоскому. Выходит, что природа предпочла самый простой вариант пространственной геометрии мира. Так стала известна геометрия пространства, в котором происходит разбегание галактик. Об этом космологи мечтали почти сто лет.

2.5. Первичный термоядерный реактор

От геометрии мира вернемся снова к его истории. Стандартная ядерная физика и термодинамика позволяют изучить физические условия в космической среде в те ранние эпохи, когда в ней не было не то что галактик или звезд, но даже сложные атомные ядра не могли существовать. Таково состояние мира в первые секунды (!) космологической эволюции. Ядерную физику привнес в космологию Гамов в 1940–1950 гг., успевший до этого (в 1929 г.) создать теорию альфа-распада атомных ядер.

В гамовской теории горячей Вселенной температура космической среды могла достигать столь высоких значений (многие миллиарды градусов), что тепловая энергия частиц была больше энергии связи нуклонов в атомных ядрах. При таких условиях космическая плазма представляла собой смесь протонов, нейтронов и электронов. Но по мере охлаждения плазмы из-за космологического расширения температура падала, и при значении около нескольких миллиардов градусов в космической среде начались термоядерные реакции (как в водородной бомбе), в ходе которых происходило образование ядер гелия-4, содержащих каждое по два протона и два нейтрона. Точный расчет, проделанный после Гамова Я. Б. Зельдовичем, Р. Вагонером и другими физиками, показал, что за первые три минуты в таком космическом термоядерном реакторе образуется примерно 25% гелия (по массе). Эта доля гелия должна сохраниться и до нынешней эпохи. На временах, превышающих три минуты, ядерный синтез прекращается: из-за быстрого космологического расширения температура вещества падает до таких значений, при которых термоядерные реакции синтеза гелия уже не идут.

И снова прямой тест: сколько реликтового гелия в современной космической среде? Данные наблюдений говорят: примерно 25% по массе. Налицо полное согласие теории первичного термоядерного синтеза и реальной распространенности гелия во Вселенной. Эта теория хорошо объясняет также и космическую распространенность реликтовых ядер гелия-3, дейтерия и лития-7.

Этот важнейший результат распространяет наши знания об истории Вселенной и нашу уверенность в существовании Большого Взрыва вплоть до тех очень давних времен, когда все расстояния в мире были в миллиард раз меньше нынешних, а возраст мира составлял всего 1–200 с. Начиная с эпохи первичных термоядерных реакций космологическая эволюция надежно прослеживается и строго документируется наблюдательными данными.

2.6. Два новых факта

Среди других свидетельств космической эволюции стоит сказать о совсем свежих фактах, которые обсуждаются в последнее время.

В ходе космологического расширения падает плотность всех не-вакуумных энергий. В частности, уменьшается число реликтовых фотонов в единице объема. Это, очевидно, означает, что в прошлом число фотонов на единицу объема было больше, чем сейчас. Оказывается, этот вывод можно непосредственно проверить в наблюдениях. Действительно, Д. А. Варшалович (Петербургский Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе) обратил внимание на одну особенность в спектрах некоторых простых молекул, наблюдаемых в космической среде на далеких расстояниях, где/когда все расстояния в расширяющемся мире были примерно в три раза меньше нынешних. Оказывается, что населенность возбужденных уровней у этих молекул заметно выше, чем у тех же молекул на близких расстояниях. Но эти возбужденные низкоэнергетические состояния возникают под действием фотонов реликтового излучения. И тот факт, что населенность указанных уровней в прошлом была высока, прямо говорит нам, что реликтовых фотонов тогда было гораздо больше (на единицу объема), чем сейчас.

Другой любопытный факт обнаружен в наблюдениях мощных вспышек космического гамма-излучения. Физическая природа этого явления сама по себе пока не очень понятна, но уверенно установлено, что эти вспышки происходят чаще всего на очень больших расстояниях, соответствующих красным смещениям, которые иногда заметно превосходят

единицу. Недавно было выяснено, что регистрируемая длительность космических гамма-вспышек зависит от величины красного смещения (т. е. расстояния до них). От самых далеких из них, обнаруживающих красное смещение около 6, излучение шло так долго, что все расстояния в мире выросли за это время примерно в 7 раз. Оказалось, что и регистрируемая длительность этих вспышек тоже в несколько раз больше (в среднем), чем у подобных же событий, наблюдаемых на сравнительно близких расстояниях. По существу это тот же самый эффект красного смещения. Последний, как мы знаем, проявляется в том, что период электромагнитных колебаний в принимаемом свете больше, чем период тех же колебаний в момент испускания. Но в расширяющемся мире растут не только периоды колебаний, в нем увеличиваются — и притом по тому же закону — любые промежутки времени. Так что наблюдаемое увеличение длительности гамма-вспышек с увеличением красного смещения — еще одно прямое указание на расширение мира.

Подобный эффект ранее был замечен и в наблюдениях вспышек сверхновых звезд. На малых расстояниях длительность вспышки измеряется, например, четырьмя неделями, а при красном смещении, равном единице, наблюдаемая длительность вспышек звезд того же типа (Ia) составляет, как оказывается, восемь недель. Для сверхновых этот эффект проявляется еще четче, чем для вспышек гамма-излучения.

3. «Темный сектор» космологии

Изучение «темного сектора» космологии, на который приходится больше 95% всей энергии/массы в современном мире, выходит в наши дни на передний план космологических исследований, становится центральной задачей науки о Вселенной, да и всей фундаментальной физики. Речь идет прежде всего о наблюдательных, эмпирических исследованиях темной материи и темной энергии. Прямые указания как на само существование этих необычных видов космической энергии, так и на их важнейшие физические свойства следуют из внушительного ряда независимых наблюдательных фактов различного характера.

3.1. Темная материя

Начнем с темной материи. Ее изучение продолжается уже более 70 лет, и к настоящему времени надежные сведения о ней вытекают из следующих ниже данных.

Кинематика галактик в больших скоплениях

Начатые еще Цвикки (см. разд. 1.2) измерения скоростей движения галактик ведутся сейчас в большом числе скоплений галактик, и эти измерения неизменно указывают на то, что скорости галактик столь же велики (около тысячи км/с), как и в том скоплении, которое в 1930-е гг. изучал Цвикки. Тем самым на новом обширном наблюдательном материале подтверждается первоначальный принципиальный вывод о наличии в мире темной материи.

Рентгеновский газ в скоплениях

Большие скопления галактик наблюдают в рентгеновских лучах с помощью орбитальных астрономических обсерваторий. Эти наблюдения позволили открыть горячий ионизованный газ в объеме скоплений; этот газ и служит источником рентгеновского излучения. Температура газа близка к ста миллионам градусов, и этой температуре отвечают средние скорости протонов — частиц плазмы, которые практически совпадают со скоростями галактик в этих скоплениях (тысячи км/с). Тем самым рентгеновские наблюдения дают независимый довод в пользу темной материи в скоплениях: горячий газ скоплений не разлетается в окружающее пространство, потому что он погружен в глубокую потенциальную яму, создаваемую в основном мощным тяготением темной материи.

Эффект Сюняева–Зельдовича

Горячий газ скоплений как индикатор темной материи проявляет себя в наблюдениях реликтового фонового излучения. Рассеиваясь на горячих электронах межгалактического газа скоплений, холодные фотоны реликтового излучения приобретают дополнительную энергию. В результате при наблюдениях на определенной частоте в релей-джинсовской части спектра обнаруживается «темное пятно» в реликтовом фоне в направлении скопления. Этот эффект уверенно регистрируется в многочисленных современных наблюдениях. Он независимо свидетельствует о реальном наличии горячего газа в скоплениях галактик, что в свою очередь ведет к выводу о наличии темной материи в скоплениях.

Эффект гравитационной линзы

Скопления галактик создают эйнштейновский эффект отклонения луча света полем тяготения. Источником света служат в этом случае далекие галактики и квазары. Изображения галактик искажаются при прохождении их света в гравитационном поле скопления, служащего своеобразной гравитационной линзой. Различают сильное и слабое линзирование. При сильном линзировании искажение столь значительно, что появляется несколько изображений источника. Это происходит в том случае, когда угловое расстояние между направлением на линзу и направлением на источник относительно невелико. При сравнительно больших угловых расстояниях искажение не так значительно (слабое линзирование), и оно сводится к изменению видимой формы источника, но уже без дробления его изображения. В обоих случаях этот эффект

дает указание на массу скопления, служащего гравитационной линзой. Изучая такие искажения для сотен тысяч и миллионов далеких галактик, можно получить сведения о величине и распределении массы в скоплениях-линзах. Наблюдения такого рода неизменно указывают на то, что скопления содержат большие массы темной материи, которые в несколько раз превышают массу содержащегося в них обычного вещества.

Местная группа

Наша Галактика вместе с Туманностью Андромеды и несколькими десятками других (мелких) галактик образует систему, называемую Местной группой. Две основные галактики группы сближаются друг с другом, причем расстояние между ними и относительная скорость сближения могут иметь наблюдаемые значения только в том случае, если в объеме группы имеется темная материя, масса которой значительно (примерно в 5–10 раз) больше суммарной массы звезд всех ее галактик.

Спутники Галактики

Наша Галактика окружена роем галактик-карликов, являющихся ее спутниками. Их наблюдаемая кинематика позволяет оценить полную массу, которая удерживает спутники на их орбитах. Эта масса значительно (примерно в 5–10 раз) больше суммарной массы звезд Галактики и ее спутников. Дополнительная невидимая масса — темная материя Галактики — образует протяженное невидимое гало, внутри которого и движутся галактики-спутники. Радиус гало в 5–10 раз больше радиуса звездного диска Галактики.

Туманность Андромеды

Тот же эффект наблюдается и в кинематике карликовых галактик-спутников Туманности Андромеды. Это означает, что темная материя Местной группы сосредоточена главным образом в индивидуальных темных гало двух ее гигантских галактик. Как и уже упомянутые факты, это обстоятельство доказывает, что темная материя — это среда, которая способна скучиваться под действием тяготения, в отличие от темной энергии, которая, скорее всего, однородно распределена в пространстве (см. далее, разд. 4.4).

Тройные системы галактик

Наблюдаемая кинематика десятков тройных систем, образуемых крупными галактиками, подобными нашей Галактике, указывает на то, что в этих системах имеется темная материя, содержащаяся в основном в индивидуальных гало галактик. И в этом случае масса темной материи также заметно (в 3–10 раз) больше суммарной массы светящегося вещества самих галактик.

Вращение спиральных галактик

Зависимость скорости вращения спиральных галактик от расстояния до центра галактики (кривая вращения) известна к настоящему времени для многих десятков изолированных галактик (рис. 5). Она прослеживается как внутри самой звездной системы, так и вне ее (по движению облаков нейтрального водорода) вплоть до расстояний, превышающих в 3–10 раз радиус звездной системы. В области вне видимого диска галактики — там, где доминирует темная материя галактического гало, — кривая вращения становится, как правило, плоской, так что скорость вращения практически не зависит от расстояния. Во всех случаях ход этой «плоской» зависимости определенно указывает на присутствие темной материи и внутри звездной системы, и вне ее, причем масса темной материи в гало галактики в 3–10 раз превышает массу звездной системы.

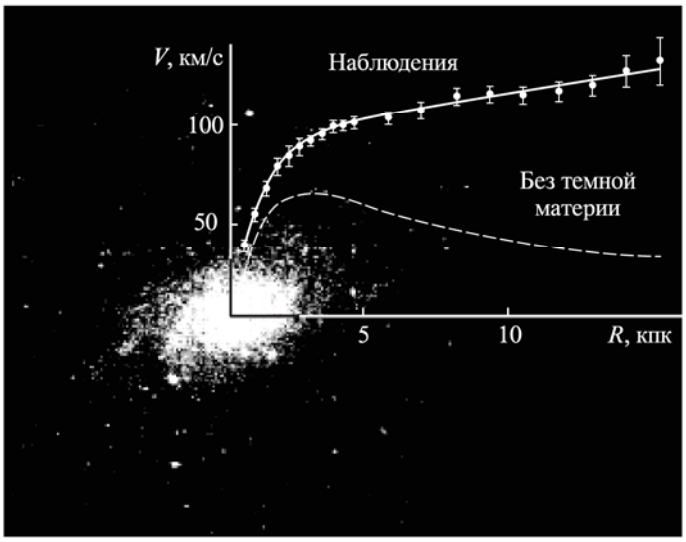

Рис. 5. Кривая вращения галактики. Наблюдаемая зависимость скорости вращения от расстояния до центра галактики возможна только при наличии темной материи в гало галактики

Заметим, что в прошлом предпринимались попытки объяснить быстрые движения галактик в скоплениях и «плоские» кривые вращения галактик без привлечения темной материи — путем модификации закона тяготения Ньютона на больших расстояниях. Однако от этой идеи пришлось быстро отказаться ввиду того, что в этом случае для каждого индивидуального скопления и каждой индивидуальной галактики необходимо было вводить свою специальную модификацию законов тяготения.

Космогонический процесс

Темная материя сыграла ключевую роль в процессе формирования галактик и их систем. На это определенно указывают теоретические исследования и детальное компьютерное моделирование возникновения и эволюции крупномасштабной кос-

мической структуры. Без темной материи мир оказался бы совсем иным, совершенно непохожим на реальный. В нем не было бы, например, скоплений галактик с горячим рентгеновским газом. И даже сами галактики не смогли бы образоваться.

Исключительно важно, что все перечисленные независимые результаты находятся в полном количественном согласии друг с другом. Это выглядит так, как если бы десять различных линий пересеклись в одной точке! Вот какова прочность эмпирической базы современной космологии.

3.2. Темная энергия

Перейдем теперь к темной энергии. Указания на ее существование вытекают из следующих независимых данных.

Ускорение космологического расширения

Этот феномен космологического масштаба был открыт по данным о нескольких десятках самых далеких сверхновых звезд. В настоящее время наблюдатели располагают материалом уже о двух сотнях этих звезд, и новые данные полностью подтверждают первоначальный результат. По этим наблюдениям удается количественно оценить плотность темной энергии как физического агента, создающего космическое антитяготение и вызывающего ускоренное расширение. Таким путем находят, что плотность темной энергии в наблюдаемой Вселенной в 3–4 раза больше средней плотности темной материи. По этой причине в нашу эпоху существования Вселенной антитяготение оказывается сильнее тяготения, производимого всеми другими видами космической энергии (рис. 6).

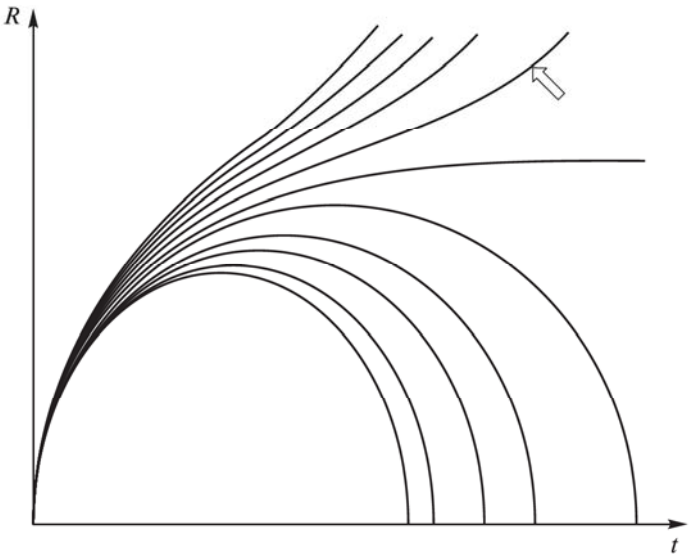

Рис. 6. Возможность ускоренного космологического расширения вытекает из теории Фридмана, которая с самого начала учитывала эффект антитяготения, описываемый космологической постоянной. Воспроизводимые здесь кривые построены впервые Леметром на основании уравнений Фридмана. Они показывают различные допускаемые теорией варианты поведения во времени «масштабного фактора», пропорционально которому изменяются все космологические расстояния в расширяющемся мире. Стрелкой отмечен вариант, который сейчас считается стандартным. В этом случае при больших временах расстояния растут почти экспоненциально; при этом растут со временем не только сами расстояния, но и скорости разбегания галактик в расширяющемся мире

Критическая плотность

Точные измерения слабой анизотропии реликтового фона, детальное изучение его пятнистой структуры позволили установить, что трехмерное пространство Большого Взрыва является или строго плоским, или практически плоским (см. разд. 2.4). Из этого обстоятельства вытекает один важный вывод. Согласно фридмановской теории, геометрия пространства однозначно связана с соотношением между полной плотностью мира и так называемой критической плотностью, которая определяется темпом расширения мира и выражается через постоянную Хаббла (коэффициент пропорциональности между скоростью и расстоянием в законе Хаббла — см. разд. 1.1). При этом в случае плоского пространства плотность мира равна критической плотности. Но раз так, то по измеренному значению постоянной Хаббла можно оценить современную полную плотность мира, т. е. суммарную космическую плотность всех видов энергии во Вселенной. В среднем по большим объемам Вселенной она составляет приблизительно один эрг на сто кубических метров, или в единицах массы 10^{-29} г/см^3. Эту величину можно представить себе более наглядно, если, например, измерять энергию в единицах энергии/массы покоя протона; тогда указанная плотность эквивалентна присутствию пяти протонов в каждом кубическом метре пространства (напомним, что масса одного протона равна $1.67 \cdot 10^{-24}$ г).

Так как плотности темной материи, барионов и излучения известны из других независимых данных, отсюда следует возможность оценить плотность темной энергии как разности между полной плотностью и суммарной плотностью других видов космической энергии. Конечно, это косвенный метод оценки. Но результат важен как способ проверки прямой оценки, сделанной по наблюдениям сверхновых звезд. Оказывается, что обе оценки плотности темной энергии практически совпадают.

Возраст мира

Задолго до наблюдательного открытия темной энергии космологов тревожила одна трудная проблема: в космологических моделях, которые в 1960–1980-е гг. считались стандартными, время, протекшее от начала космологического расширения, оказывалось досадно малым — меньше возраста

самых старых звезд Галактики. Конечно, этого не должно быть, и уже тогда И. С. Шкловский, Н. С. Кардашев, Я. Б. Зельдович высказывали предположение, что делу могло бы помочь всемирное отталкивание, описываемое эйнштейновской космологической постоянной: в моделях с отличной от нуля космологической постоянной возраст мира мог бы быть достаточно большим (см., напр., [7]). Так что уже сам по себе возраст самых старых объектов мира подсказывал возможность существования антитяготения и темной энергии.

Местный хаббловский поток

Наблюдения движений галактик на расстояниях всего 1.5–3 Мпк от нас показали, что в этом очень малом по космологическим меркам масштабе происходит регулярное разбегание галактик по закону Хаббла, причем постоянная Хаббла близка к значению 60–75 км/с/Мпк, которое известно по наблюдениям в гораздо больших масштабах. Этот местный хаббловский поток расширения может существовать и иметь наблюдаемые физические характеристики (постоянная Хаббла и дисперсия скоростей) только в том случае, если его динамика определяется как тяготением Местной группы, так и антитяготением темной энергии, равномерно распределенной во всем пространстве. Отсюда возникает возможность дать оценку плотности темной энергии в нашем ближайшем галактическом окружении: эта «локальная» плотность близка, как оказывается, к «глобальной» плотности (известной по наблюдениям сверхновых и реликтового излучения) или даже точно совпадает с нею. При этом антитяготение оказывается сильнее тяготения уже на расстояниях, превышающих примерно всего 1.3 Мпк от нас. Местная группа галактик заключена в объеме с радиусом, не превосходящим 1 Мпк, и потому в ней преобладает тяготение, которое делает группу гравитационно связанной и квазистационарной. А поток разбегания галактик начинается как раз на расстояниях, немного превышающих 1.3 Мпк, так что им управляет главным образом антитяготение темной энергии [5, 6].

Формирование крупномасштабных структур

Уже упомянутое выше компьютерное моделирование процессов формирования крупномасштабной космической структуры дает наилучшие результаты, если в нем учитывается не только темная материя, но и темная энергия, причем предполагаемая плотность однородной темной энергии должна иметь как раз ее наблюдаемое значение. В этом случае космогонический процесс может длиться достаточно долго, чтобы галактики и их системы успели приобрести их наблюдаемый сейчас вид. Кроме того, реальные квазистационарные структуры — галактики, их группы и скопления — должны иметь размеры, не превосходящие в каждом случае некоторое предельное значение, определяемое массой объекта и плотностью темной энергии: только тогда в занимаемом ими объеме преобладает тяготение и они могут существовать как гравитационно-связанные системы. И этот вывод тоже подтверждается наблюдательными данными.

Как мы видим, в случае темной энергии имеет место «пересечение» в одной точке по крайней мере пяти различных и не зависящих друг от друга линий аргументации.

3.3. Астрономические инструменты сегодня и завтра

Подчеркнем еще раз: создание современного наблюдательного фундамента космологии стало возможным благодаря использованию совершенной астрономической техники, позволяющей вести наблюдения во всем диапазоне электромагнитных волн — от радиоволн до гамма-излучения. Для целей космологии используются наземные, баллонные и орбитальные инструменты, оснащенные лучшими светоприемниками и другой первоклассной электронной аппаратурой. Космологические исследования велись и ведутся на крупнейших инструментах — это телескоп БТА с зеркалом диаметром 6 м в САО РАН (еще недавно самым большим в мире), четыре телескопа с зеркалами по 8 м (VLT — Very Large Telescopes) в Европейской Южной Обсерватории, два телескопа KECK (10 м) на Гавайях, Хаббловский космический телескоп, радиотелескоп РАТАН-600, а также космические лаборатории IRAS (инфракрасное излучение), ROSAT, Chandra, Интеграл, XMM-Newton (рентгеновские лучи), COBE, Реликт, WMAP (микроволновое радиоизлучение). В стадии подготовки находятся новые масштабные проекты, такие как Радиоастрон и Миллиметрон, Спектр-Ультрафиолет, Спектр-Рентген-Гамма, Planck, SNAP/JDEM; последний проект специально нацелен на изучение темной энергии по регистрации сверхновых звезд на больших расстояниях. О проекте создания 42-метрового телескопа мы уже упоминали в разд. 2.2.

4. Проблемы, идеи, гипотезы

Космологические исследования используют все богатство современной физики, причем общие физические законы, надежно установленные и проверенные в лабораторном эксперименте, применимы к изучению эволюции Вселенной начиная по крайней мере с эпохи термоядерных реакций, с первых секунд существования мира. Комбинация большого числа наблюдений с надежной физической теорией позволила к настоящему времени сделать обоснованные выводы о ряде ключевых физических свойств наблюдаемой Вселенной. Выше мы рассказали о главных из них, а теперь обратимся к текущим проблемам, идеям и гипотезам в космологии (более подробное изложение читатель может найти в нашей книге [5]).

4.1. Очень ранняя Вселенная

Естественно спросить: а что происходило во Вселенной до эпохи термоядерных реакций? С определенной степенью уверенности можно утверждать, что космологическое расширение имело место и в более ранние времена, когда возраст мира был и много меньше одной секунды. Но суждения о самых ранних стадиях космологического расширения становятся тем менее надежными, чем глубже в прошлое они обращены. Наблюдения тут уже невозможны; более того, стремясь мысленно приблизиться к самому началу мира, когда речь идет уже о немыслимо высоких плотностях и температурах, мы выходим за рамки применимости общих законов физики — они установлены при других, гораздо более скромных значениях физических параметров. Чтобы хоть что-то сказать о тех временах, приходится по необходимости прибегать к далекой экстраполяции стандартных законов в область, где для их применимости не существует, вообще говоря, никаких объективных оснований. И тем не менее широкое распространение в последние 20–25 лет получили теории очень ранней Вселенной, которые оперируют колоссальными плотностями, исключительно малыми промежутками времени и пространственными интервалами — очень далеко за пределами применимости стандартной физики.

Такова, например, теория инфляции, у которой имеется много сторонников. В ее основе лежит смелая гипотеза о причине космологического расширения, предложенная сорок лет назад Э. Б. Глинером, работавшим тогда в Петербургском (Ленинградском) Физтехе. Согласно его идее, исходный разгон вещества создало антитяготение первичного космического вакуума. При этом предполагается, что и само космическое вещество могло рождаться из гипотетического первичного вакуума. Многочисленные попытки развивать эту идею привели к сотням различных теоретических моделей, нередко весьма изобретательных. Самый интересный результат в этой области — теория происхождения сгущений и разрежений в космическом веществе, — тех самых первоначальных отклонений от однородности, которые дали затем начало галактикам и их скоплениям и оставили отпечатки в реликтовом фоне (см. разд. 1.3). Эту теорию построили В. А. Муханов, Г. В. Чибисов (ФИАН), А. А. Старобинский (ИТФ РАН). Они показали, что такие неоднородности могли бы возникнуть благодаря квантовым флуктуациям первичного космического вакуума. На этом пути не удается пока вычислить теоретически амплитуду неоднородностей, но их спектр (т. е. зависимость амплитуды от масштаба возмущений) получается правильным — он хорошо согласуется с наблюдениями реликтового фона.

4.2. Бариогенез

Теория ранней Вселенной тесно связана с физикой элементарных частиц (эта тема подробно обсуждается в новой книге [8]). Один из ключевых вопросов на стыке космологии и микрофизики — барионная асимметрия Вселенной. Тела природы, от нашей планеты Земля (и всего, что на ней) и до самых далеких звезд, сделаны из «обычных» частиц — протонов, нейтронов и электронов. Между тем, согласно одному из основных принципов микрофизики, в природе имеет место симметрия — равноправие — между частицами и античастицами. Где же те античастицы — антипротоны, антинейтроны, позитроны, — которые в силу этой симметрии должны присутствовать в мире в тех же количествах, что и обычные частицы? Физики хорошо знают античастицы: их получают на ускорителях и наблюдают в космических лучах. Но их число ничтожно по сравнению с числом частиц. Какова причина этого перекоса в природе?

Возможный ответ на этот вопрос был предложен А. Д. Сахаровым и В. А. Кузьминым в 1960–1970-е гг. Идея состоит в том, что симметрия между частицами и античастицами является в действительности не строгой, а слегка нарушенной. Было показано, что даже очень слабой исходной асимметрии такого рода может быть достаточно, чтобы в экстремальных физических условиях, существовавших в ранней Вселенной, возникла затем сильная асимметрия, которая имеет место сейчас. Процесс, в результате которого это произошло, называют космологическим бариогенезом.

Одно из предсказаний этой теории — нестабильность протона, т. е. возможность его самопроизвольного распада на другие частицы. Проверка этого предсказания в физическом эксперименте ведется в наши дни в ряде крупных лабораторий мира. Итог пока таков: распад протона не обнаружен. И если он и возможен, то с характерным временем не меньше, чем 10^{32} лет, что на множество порядков больше возраста Вселенной. Вопрос, таким образом, остается открытым. Как бы то ни было, очень большое время жизни протона — это большая удача для нас самих, состоящих из протонов, электронов и нейтронов...

4.3. Темные частицы

Четверть века назад Я.Б. Зельдович активно развивал представление о том, что темная материя могла бы состоять из нейтрино. Космологические нейтрино и антинейтрино определенно имеются во Вселенной; они — как и фоновое излучение — представляют собой остаток, реликт горячего состояния Вселенной. Нейтрино (всех трех сортов) вышли из равновесия с веществом, когда возраст мира был меньше одной секунды, и с тех пор присутствуют

во Вселенной, взаимодействуя с остальными видами энергии практически только гравитационно. Их должно быть около 300 в среднем в каждом кубическом сантиметре пространства. В начале 1980-х гг. казалось, что лабораторный физический эксперимент позволяет этим частицам иметь массы, подходящие для того, чтобы реликтовые нейтрино могли играть роль темной материи. Сейчас, однако, стало ясно, что массы нейтрино в действительности значительно меньше, так что на них можно списать в лучшем случае примерно 10% темной материи, не больше. Каковы же тогда основные носители темной материи?

Одна из современных гипотез, выросшая из идеи Зельдовича, заключается в том, что темная материя состоит в основном хоть и не из нейтрино, но из частиц, в некотором смысле очень похожих на нейтрино: они стабильны, не имеют электрического заряда и участвуют только в гравитационном и электрослабом взаимодействиях. Однако такие частицы сильно отличаются от нейтрино по массе: они должны быть очень тяжелыми — примерно в тысячу раз тяжелее протона, так что энергия покоя такой частицы составляет примерно 1 эрг. Такие частицы до сих пор не были известны ни в теории, ни в физическом эксперименте. Если они действительно существуют, то, как показывает теория, они вполне могли бы присутствовать во Вселенной в нужном количестве. Таким путем космология приходит к интересному теоретическому предсказанию: в природе должны существовать массивные стабильные слабовзаимодействующие элементарные частицы, на долю которых приходится примерно 20% всей массы и энергии Вселенной, что в 4–5 раз больше, чем вклад барионов (протонов и нейтронов).

Прямой поиск таких частиц ведется в настоящее время в ряде крупных лабораторий мира. Не исключено также, что «темные частицы» могли бы проявить себя и в экспериментах на вступающем в скором времени в строй самом мощном ускорителе — Большом адронном коллайдере (LHC) в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария). На нем частицы будут разгоняться до энергий, заметно превышающих энергию покоя темных частиц. И если природа склонна отдавать этим частицам заметно больше (в 4–5 раз) энергии, чем барионам, то почему бы таким частицам не рождаться в массовом порядке на LHC?

4.4. Космологическая постоянная

В настоящее время обсуждается несколько различных вариантов теоретической интерпретации темной энергии. Самая простая (но и вместе с тем весьма далеко идущая) из них исходит из предположения, что темная энергия задается всего одной и притом постоянной во времени физической характеристикой, называемой космологической постоянной Эйнштейна. Эта величина была введена в общую теорию относительности Эйнштейном в 1917 г. в той его космологической работе, о которой мы уже упоминали выше (см. разд. 1.4). Новая константа физики была нужна для того, чтобы с ее помощью обеспечить неизменное во времени состояние мира в целом, — условие, которое казалось тогда Эйнштейну обязательным. Космологическая постоянная, обозначаемая греческой буквой Λ, служила для описания всеобщего отталкивания, которое способно сбалансировать всемирное тяготение. После работ Фридмана и открытий Слайфера и Хаббла идея статической, неизменной во времени Вселенной была оставлена. Но тогда, как говорил Эйнштейн, можно забыть и о космологической постоянной — по крайней мере до тех пор, пока в ее пользу не появятся объективные эмпирические основания. Эти основания и возникли с открытием космологического ускорения в 1998–1999 гг. Космологическая модель с положительной величиной Λ очень хорошо описывает наблюдаемый феномен космологического ускорения и безупречно согласуется со всем комплексом современных наблюдательных данных. Это стандартная космологическая модель сегодняшнего дня.

4.5. Темная энергия как вакуум

Согласно предложению Э. Б. Глинера, высказанному еще в 1965 г., космологическую постоянную можно рассматривать как физическую характеристику особого рода сплошной среды, идеально равномерно заполняющей все пространство Вселенной. Плотность этой среды не только однородна, но и не зависит от времени, будучи просто равной (с точностью до постоянного коэффициента) величине Λ. Этими свойствами такая среда обладает во всех системах отсчета. Если считать, что темная энергия действительно описывается космологической постоянной, то ее и нужно тогда представлять себе макроскопически как среду со всюду и всегда постоянной плотностью. Из этого представления вытекают особые феноменологические свойства темной энергии. Так, оказывается, что у темной энергии имеется давление, причем оно отрицательно по знаку, а по абсолютной величине равно плотности энергии (напомним, что плотность энергии и давление имеют одну и ту же размерность).

Отрицательное давление вообще-то встречается в природе и технике; но такой связи между давлением и плотностью нет ни у одной другой среды в мире. Как следует из теории, темная энергия с такой плотностью и давлением не может — в отличие от любых других сред — служить в качестве системы отсчета, ибо движение и покой относительно нее неразличимы. Тем же свойством обладает абсолютная пустота — пространство, полностью свободное от любых форм энергии. Такая неразличимость движения и покоя является главным механическим

свойством вакуума. Раз им обладает темная энергия, описываемая космологической постоянной, то, значит, эта среда тоже является вакуумом. Будем называть этот особый вакуум вакуумом Эйнштейна–Глинера (ЭГ-вакуум), чтобы отличать его от вакуумов другой природы, рассматриваемых, например, в квантовой механике.

Существуют также теоретические модели темной энергии, отличные от модели вакуума. Если отношение давления к плотности отлично от минус единицы, то это уже не вакуум. Когда это отношение больше минус единицы, то такого рода темную энергию называют квинтэссенцией. Если отношение меньше минус единицы, то в этом случае говорят о фантомной энергии. Свойства этих гипотетических форм темной энергии интересны и (особенно фантомной энергии) удивительны. Однако наблюдения все более и более определенно свидетельствуют все же в пользу вакуума как самой вероятной формы темной энергии.

4.6. Прошлое и будущее

Стандартная космологическая модель, в которой темная энергия представлена космологической постоянной, дает представление об энергетическом составе Вселенной (см. разд. 1.4) в различные эпохи в прошлом и будущем. В этой модели плотность темной энергии остается всегда одной и той же. Что же касается темной материи, барионов и излучения, то их плотности убывают из-за общего расширения мира. Глядя назад по времени, мы можем узнать, что, например, в эпоху первичных термоядерных реакций доля темной энергии в общем энергетическом балансе мира была пренебрежимо мала, а доля излучения приближалась тогда к 100%. Соответственно в ту эпоху роль антитяготения в динамике Вселенной была пренебрежимо малой, и ее расширение управлялось почти исключительно тяготением, создаваемым излучением. Излучение преобладало по энергии приблизительно до эпохи рекомбинации (до возраста мира около 330 тыс. лет), а после этого главный вклад в энергию мира вносили темная материя и барионы. Их тяготение сравнялось по силе с антитяготением примерно 7 млрд лет назад (см. разд. 2.2), и с тех пор космологическое расширение происходит с ускорением. В будущем Вселенной ускоряющееся расширение уже никогда не будет замедляться, так что Вселенную ожидает неограниченно долгое расширение, в ходе которого темная энергия ЭГ-вакуума станет безраздельно господствовать в мире. Последнее заключение — прогноз на миллиарды лет вперед — является, конечно, экстраполяцией, прямую эмпирическую проверку которой способны будут осуществить лишь наблюдатели далекого будущего.

Хотя вклад каждой энергии в полную плотность мира изменяется из-за космологического расширения, в космологии существуют четыре постоянные, не зависящие от времени величины, которые представляют четыре соответствующие энергии в стандартной космологической модели — они называются фридмановскими интегралами. Удивительным образом эти константы близки по порядку величины. Фридмановские интегралы имеют размерность длины, и их значения заключены в пределах от 0.03 до 3 млрд световых лет. Столь близкое (по порядку величины) совпадение этих величин не вытекает априори ни из каких законов физики или уравнений теории; в принципе эти величины могли бы различаться на неограниченное число порядков. Их близость (в пределах двух порядков величины) выявляется лишь при эмпирическом анализе данных наблюдений. Вряд ли этот факт можно считать простой арифметической случайностью. Скорее в нем нужно видеть указание на существование глубинной связи между вакуумом и невакуумными формами космической энергии; эта связь имеет характер определенной внутренней (не геометрической) симметрии, объединяющей четыре космические энергии [5, 6].

4.7. Эйнштейновское антитяготение

Почему же темная энергия с ее положительной плотностью служит источником антитяготения? Дело в том, что, согласно общей теории относительности, тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением. Эффективной гравитирующей плотностью служит сумма: плотность среды плюс утроенное давление (см., напр., [5, 6]). Так как давление ЭГ-вакуума есть минус плотность энергии, его эффективная плотность оказывается отрицательной и равной минус двум плотностям. Этот последний «минус» и дает всеобщее отталкивание во Вселенной.

Если сила ньютонова взаимного тяготения тел друг к другу создается их собственными массами, то сила антитяготения, действующая на тела, создается не самими этими телами, а темной энергией, в которую все они — от элементарных частиц до самых больших скоплений галактики — погружены. У Ньютона сила притяжения убывает с расстоянием как его обратный квадрат; а у Эйнштейна сила антитяготения возрастает прямо пропорционально расстоянию. Чтобы дать представление о соотношении этих сил, скажем, что два электрически нейтральных атома водорода, погруженные в ЭГ-вакуум (в отсутствие вокруг любых других тел) на расстоянии примерно в полметра друг от друга, испытывают силу антигравитационного отталкивания, которая равна по величине силе их взаимного гравитационного притяжения. На бóльших расстояниях антитяготение сильнее тяготения.

4.8. Квантовый вакуум?

Но каковы не макроскопические, а микроскопические свойства темной энергии? Из чего она состоит? В конце 1960-х гг., задолго до открытия

темной энергии, Я. Б. Зельдович [9] обсуждал возможную связь между космологической постоянной и квантовым вакуумом элементарных частиц и физических полей. Этот физический вакуум — тоже не абсолютная пустота, он имеет свою отличную от нуля энергию. Ее носителями служат так называемые нулевые колебания квантовых полей, всегда существующие в пространстве даже и в отсутствие в нем каких-либо частиц. Если этот квантовый вакуум рассматривать макроскопически как некую среду, то ему следует приписать не только плотность энергии, но также и давление. При этом связь между его давлением и плотностью должна быть в точности той же самой, что и у ЭГ-вакуума — других вариантов здесь нет. Так не тождественны ли оба эти вакуума?

Было бы замечательно, если бы удалось доказать, что это действительно так: объединение кажущихся разными сущностей — плодотворнейший путь развития науки о природе, как это известно еще со времен Дж. К. Максвелла, объединившего электричество и магнетизм. Но до сих пор тождественность космического и квантового вакуумов не удается ни доказать, ни опровергнуть. Неясно вообще, как можно было бы это сделать в современной стандартной фундаментальной теории. Не высказано пока и никаких предложений насчет того, как идею Зельдовича можно было бы проверить — доказать или опровергнуть — в физическом эксперименте или астрономическом наблюдении.

4.9. Электрослабый масштаб?

Но, может быть, вопрос нужно ставить иначе? Некоторые самые предварительные соображения на этот счет активно обсуждаются сейчас в теоретической физике. Например, Н. Аркани-Хамед и его коллеги [12] высказывают предположение о том, что плотность темной энергии может быть выражена (и притом весьма простым образом) через характерную величину энергии электрослабого взаимодействия. Последняя близка к 1 эргу (что приблизительно равно 1 ТэВ), причем этому энергетическому масштабу нередко придается центральная роль во всей физике частиц и полей. Но вспомним, что как раз подобная энергия/масса приписывается гипотетическим частицам темной материи. Если так, то весь «темный сектор» космологии мог бы задаваться единым энергетическим масштабом. В частности, на этой основе можно, как оказывается [6], теоретически объяснить приближенное равенство фридмановских интегралов (см. разд. 4.6) для темной энергии, темной материи и излучения (величина интеграла для барионов должна вытекать из теории бариогенеза).

Но от догадки [12] до настоящего решения проблемы темной энергии все еще очень далеко. Ее микроскопическая структура так и остается неподдающейся загадкой. Она все яснее осознается сейчас как одна из наиболее острых проблем (если не самой острой проблемой) всей фундаментальной науки. Физика темной энергии затрагивает, возможно, самые глубинные явления, процессы и связи в природе.

4.10. Антропный принцип

По мнению С. Вайнберга [10], проблема темной энергии состоит даже не столько в самом существовании этой формы энергии (вакуум несомненно должен присутствовать в мире), сколько в конкретном значении ее плотности. Если это действительно космологическая постоянная, то почему она имеет именно то численное значение, которое дается астрономическими наблюдениями? Он считает этот вопрос необычайно трудным и полагает, что в поисках ответа на него стоит, возможно, обратиться за подсказкой к популярному в последние годы направлению мысли, известному под названием «антропный принцип». (Прилагательного «антропный» в нашем языке до сих пор не существовало; было слово «антропологический» с тем же греческим корнем, но вместо него в этом случае используют более короткое слово, похожее на английское «antropic»; а «человечный» или «человеческий» тут явно не подходит.)

Что же утверждает антропный принцип? Одну из первых формулировок (не лишенную иронии) дал еще в 1960-е гг., когда и самого названия антропного принципа еще не существовало, знаменитый космолог из ГАИШ А. Л. Зельманов: наблюдаемая Вселенная такая, какая она есть, ибо другие вселенные развиваются без наблюдателя. Ироническое, если не сказать сильнее, отношение к антропному принципу сопровождало его с самого начала. Но даже и критики готовы согласиться, что в антропном принципе присутствует привлекательная здравая мысль. Основательные физические и астрономические аргументы в рамках этого подхода [11] были предложены в разные годы Б. Картером, И. Л. Розенталем, Р. Дикке, Дж. Барроу, другими физиками и космологами. Сторонники антропного принципа обращают прежде всего внимание на то, что наша Вселенная неплохо приспособлена для жизни. Действительно, она не слишком мала и не слишком велика для человека. Она, несомненно, находится в зрелом возрасте: в ней многие звезды успели проэволюционировать и произвести достаточно углерода, составляющего атомарную основу живого. Но она все еще в цветущем возрасте,в ней светло и тепло, чего не будет уже через, скажем, 30–50 млрд лет, когда все наличные звезды погаснут, а материал для образования новых светил будет исчерпан. Вселенная прошла ряд разнообразных этапов эволюции, начиная от состояния очень горячей плазмы. В ходе этой эволюции вещество остывало и в нем росли и развивались слабые отклонения от однородности,

которые при возрасте мира в 1–2 млрд лет превратились в наблюдаемые космические тела и системы. В свою очередь это дало начало эволюции другого рода, которая породила со временем органическую жизнь, а затем и разум, способный изучать, среди прочего, и свою космическую предысторию. Особое значение придается тому несомненному факту, что набор физических констант в нашем мире, а также и управляющие им основные законы природы определенно благоприятны для возникновения и развития жизни.

Специалисты различают слабый антропный принцип и сильный антропный принцип. Слабый принцип утверждает: если в мире много разнообразных вселенных, мы находимся там, где наша жизнь возможна. Сильный принцип звучит суровее: наша Вселенная должна быть создана такой, чтобы в ней с самого начала была предусмотрена возможность нашего естественного существования. Во втором случае допускается, что других вселенных в мире может и не быть, но тогда наша Вселенная, удобная для существования жизни, могла быть «сотворена», возможно, не с первой попытки.

Вайнберг предпочитает представление о том, что вселенных много, что они постоянно рождаются и умирают, а вся их совокупность образует Мультимир (Multiverse), в котором все всегда и везде изменяется, но который в целом находится в вечном квазистационарном состоянии. Множественность вселенных — одна из самых увлекательных идей последних лет, рожденная на грани физики и научной фантастики. Действительно, если вселенных много или даже бесконечно много, то почему бы среди них не быть и таких, которые похожи на нашу. В этом духе обсуждается и вопрос о природе физических констант в нашем мире: «наш» набор констант, включая сюда и космологическую постоянную, — всего лишь дело случая, он возник как одна счастливая комбинация из огромного множества всех возможных наборов случайных величин.

Но, как всегда в физике, рано или поздно возникает критический вопрос: что нужно пронаблюдать или измерить в лаборатории, чтобы проверить антропный принцип в любом из его вариантов? Ответа нет и, скажем прямо, не предвидится. На этом основании многие полагают, что этот круг идей выпадает из рамок физики как науки экспериментальной. Вайнберг согласен: хорошо бы всегда держаться этих рамок; но та стандартная физика, которую мы сейчас знаем, никогда, похоже, не справится с проблемой темной энергии...

Заключение

Подведем итоги. За 90 лет своего существования, считая от первых наблюдений Слайфера и теоретической работы Эйнштейна, космология превратилась из области абстрактных и почти фантастических, как многим казалось, занятий на далекой периферии тогдашней науки в одно из центральных направлений естествознания XXI в. Она обладает надежным наблюдательным фундаментом, который складывается из базовых фактов о Вселенной. На этой основе строится и развивается теория, прочно связанная со всей современной физикой, включая общую теорию относительности, ядерную физику и физику элементарных частиц. Космология ставит новые важные вопросы, выдвигает содержательные идеи и гипотезы, делает смелые предсказания, которые находятся на переднем крае науки. Она дает широкую, богатую и согласованную картину мира, которая становится сейчас неотъемлемой частью общей культуры человечества. А открытые и нерешенные проблемы в живой, сложной науке всегда есть, да и должны быть — это источник ее дальнейшего развития.

В заключение мы хотели бы извиниться перед читателями «Вестника» за, быть может, чрезмерно популярный стиль изложения и некоторое «разжевывание» ряда космологических истин, вполне очевидных для профессионалов. Это сделано нами для того, чтобы широкому кругу читателей стала ясна абсолютная беспочвенность недавних агрессивных нападок на современную эволюционную космологию со стороны некоторых новоявленных воинствующих теистов.

Авторы благодарят М. В. Сажина за полезную дискуссию.

Работа А. Д. Черника выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 06-02-16366).

Литература

1. *Новиков И.Д., Шаров А.С.* Человек, открывший взрыв Вселенной. М., 1989.
2. *Вейнберг С.* Первые три минуты. М., 1982.
3. *Сажин М.В.* Современная космология в популярном изложении. М., 2002.
4. *Черепащук А.М., Чернин А.Д.* Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003.
5. *Черепащук А.М., Чернин А.Д.* Горизонты Вселенной. Новосибирск, 2005.
6. *Чернин А.Д.* // УФН. 2008. **178**, № 3. С. 267.
7. *Тропп Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д.* Александр Александрович Фридман. Труды и жизнь. М., 1988.
8. *Горбунов В.С., Рубаков В.А.* Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого Взрыва. М., 2007.
9. *Зельдович Я.Б.* // УФН. 1968. **95**, № 2. С. 209.
10. *Weinberg S.* Living in the multiverse // Universe or Multiverse? / Ed. by B. Carr. Cambridge, 2007. P. 14.
11. *Розенталь И.Л.* Элементарные частицы и структура Вселенной. М., 1984.
12. *Arkani-Hamed N., Hall L.J., Kolda C., Murayama H.* // Phys. Rev. Lett. 2000. **85**. P. 4434.
13. *Лифшиц Е.М.* // ЖЭТФ. 1946. **16**. С. 587.

Поступила в редакцию
20.02.2008