

А. М. ЧЕРЕПАЩУК, А. Д. ЧЕРНИН

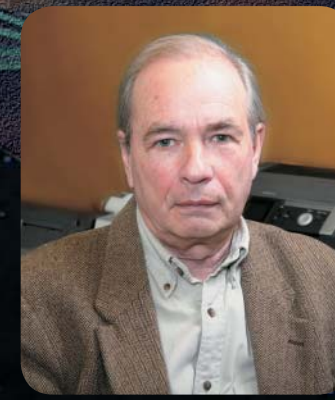
# КОСМОЛОГИЯ: ОТКРЫТИЯ И ЗАГАДКИ

Космология — особая наука. Ее предмет — вся Вселенная, рассматриваемая как единое целое, как физическая система с особыми свойствами, которые не сводятся к сумме свойств населяющих ее астрономических тел и физических полей. Размеры наблюдаемой Вселенной приблизительно 10 миллиардов световых лет. Это самый большой по пространственному масштабу объект науки. К тому же он существует в единственном экземпляре. В этом отношении космология, очевидно,

сильно отличается от других естественнонаучных дисциплин. Но, как и в любой науке, главное в космологии — надежно установленные факты, достоверные сведения о реальных объектах, процессах и явлениях. В статье известных российских астрофизиков рассказывается о четырех крупнейших открытиях в космологии и трудных загадках этой науки — как старых, так и совсем свежих, которые еще предстоит разрешить



ЧЕРЕПАЩУК Анатолий Михайлович — академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ. Действительный член Королевского астрономического общества (Великобритания). Лауреат премии им. А. А. Белопольского (2002). Сфера научных интересов: физика звезд, исследование тесных двойных звезд на поздних стадиях эволюции. Автор и соавтор более 300 научных работ



ЧЕРНИН Артур Давидович — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ. Лауреат Ломоносовской премии МГУ (1996). Сфера научных интересов: теоретическая астрофизика. Автор и соавтор более 200 научных работ

## Чем дальше, тем быстрее

Современная космология берет начало в первые десятилетия XX века. 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 следовал из наблюдений спектров галактик: их движение проявляло себя в сдвиге спектральных линий к красному концу спектра.

Такого рода *красное смещение*, которое можно интерпретировать как давно известный в физике эффект Доплера, 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 на расстояниях, не превышающих примерно 1 мегапарсек\* (Мпк). Если расстояния больше 1 Мпк, то галактики, по выражению Слайфера, «разбегаются в пространстве».

В 1929 г. другой американский исследователь, Эдвин Хаббл, которого нередко называют величайшим астрономом XX в., определил, что движение разбегающихся галактик следует простому закону: скорость  $V$  удаления от нас галактики пропорциональна расстоянию  $R$  до нее:  $V = HR$ . Это соотношение между скоростью и расстоянием называют сейчас *законом Хаббла*, а коэффициент пропорциональности  $H$  — постоянной Хаббла. Величина  $H$  постоянна в том смысле, что она одинакова для всех галактик и не зависит ни от расстояния до галактики, ни от направления

\* 1 мегапарсек = 1 000 000 парсек; 1 парсек  $\approx$  3,26 светового года

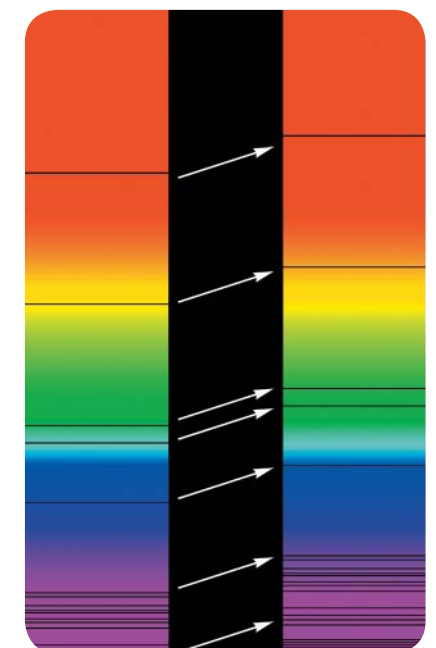


Вселенная — мир галактик. На этом снимке красивого скопления в созвездии Персея видно множество галактик разных размеров и форм, возраста и цвета. Некоторые из них выглядят мелкими расплывчатыми пятнами, но каждая представляет собой огромную звездную систему, которая содержит десятки и сотни миллиардов светил, похожих или не очень на нашу собственную звезду — Солнце. Самые маленькие и слабые пятнышки на фото — это наиболее далекие галактики, некоторые из которых находятся вблизи границ видимой Вселенной. Свет от них идет миллиарды лет, так что мы наблюдаем их такими, какими они были миллиарды лет назад.

Фото Ж.-Ш. Куилландра, Д. Ансельми

На рисунке сверху условно изображен оптический эффект Доплера. Это изменение длины волны света, испускаемого источником, который движется по отношению к наблюдателю. Для удаляющегося источника длина волны увеличивается, т. е. свет «краснеет». В астрономии относительное увеличение длины волны излучения  $z = \Delta\lambda/\lambda$  (как и само явление) называют красным смещением. Обнаруживают его по сдвигу спектральных линий (на рисунке справа). При малых красных смещениях ( $z \ll 1$ ) справедлива приближенная формула  $V = cz$ . Здесь  $V$  — скорость источника,  $c$  — скорость света, равная 300 000 км/с

Спектр неподвижного источника света (на Земле)	Спектр движущегося источника (удаляющегося)
--	---



на нее на небе. По современным данным, значение постоянной Хаббла лежит в пределах от 60 до 75 км/с на мегапарсек.

Удаление галактик по закону Хаббла наблюдают сейчас вплоть до расстояний в несколько тысяч мегапарсек. Если галактика находится на расстоянии, скажем, 1000 Мпк, то она движется от нас прочь со скоростью 60–75 тыс. км/с. Это огромная скорость, которая лишь в 4–5 раз уступает скорости света. Всеобщее разбегание галактик — самый грандиозный феномен природы.

Открытия Слайфера и Хаббла, а также дальнейшие исследования заложили наблюдательную основу, на которой строится и развивается вся современная космология.

Мы знаем теперь, что живем в огромном мире, который к тому же расширяется со временем. Расширение началось около 14 млрд лет назад; этот гигантский промежуток времени и считается возрастом мира. А событие, которое породило космологическое расширение, называют *Большим Взрывом*.

Но какова физическая природа Большого Взрыва? Откуда взялись у галактик огромные скорости разбегаания? Что заставило их стремительно удаляться друг от друга? На эти вопросы не смогли ответить ни знаменитые астрономы-наблюдатели, основатели космологии, ни великие физики, начиная с Эйнштейна. Нет ответа на них и у космологов наших дней. Возможно, это самая трудная и са-

мая не поддающаяся разрешению загадка из когда-либо возникавших в естественных науках. Мы не знаем, с чего, собственно, началось космологическое расширение, не имеем представления о физике, которая могла бы за этим стоять. Не известно даже, как нужно ставить задачу о причине космологического расширения. Тем более ничего нельзя сказать о том, что было до этого события, и даже не вполне понятно, что значит здесь «до».

И тем не менее сама возможность расширения мира была предсказана русским математиком Александром Фридманом, классиком мировой науки. Пользуясь теорией Эйнштейна, Фридман разработал в 1922–1924 гг. физико-математическую модель мира, который

находится в состоянии общего расширения. Прямым следствием этой модели является закон пропорциональности скорости и расстояния, который и был открыт в наблюдениях Хаббла. Космологическая модель Фридмана — теоретическая база современной космологии. Эта модель в сочетании с данными астрономических наблюдений очень хорошо описывает динамику космологического расширения. Конечно, не с «самого начала», о котором ничего не известно. Но замечательно, что теория Фридмана справедлива сразу же после первой секунды космологического расширения. Кроме этой первой секунды, вся дальнейшая история мира нам известна; более того, эта теория говорит и о будущем Вселенной: она

ЭДВИН ХАББЛ (1889—1953), АСТРОНОМ ОБСЕРВАТОРИИ МАУНТ-ВИЛСОН В КАЛИФОРНИИ, НАБЛЮДАЛ ГАЛАКТИКИ С ПОМОЩЬЮ САМОГО МОЩНОГО В ЕГО ВРЕМЯ ТЕЛЕСКОПА ДИАМЕТРОМ 2,5 м. В 1929 г. ОН УСТАНОВИЛ КОЛИЧЕСТВЕННУЮ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ В ЯВЛЕНИИ РАЗБЕГАНИЯ ГАЛАКТИК (ЗАКОН ХАББЛА)



Закон Хаббла связывает простым соотношением скорость  $V$  галактики и расстояние  $R$  до нее:  $V = HR$ . Чем дальше находится галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Коэффициент пропорциональности  $H$  — постоянная Хаббла; ее значение соответствует увеличению скорости разбегания на 60—75 км/с на каждый мегапарсек расстояния

предсказывает, что космологическое расширение будет продолжаться неограниченно долго.

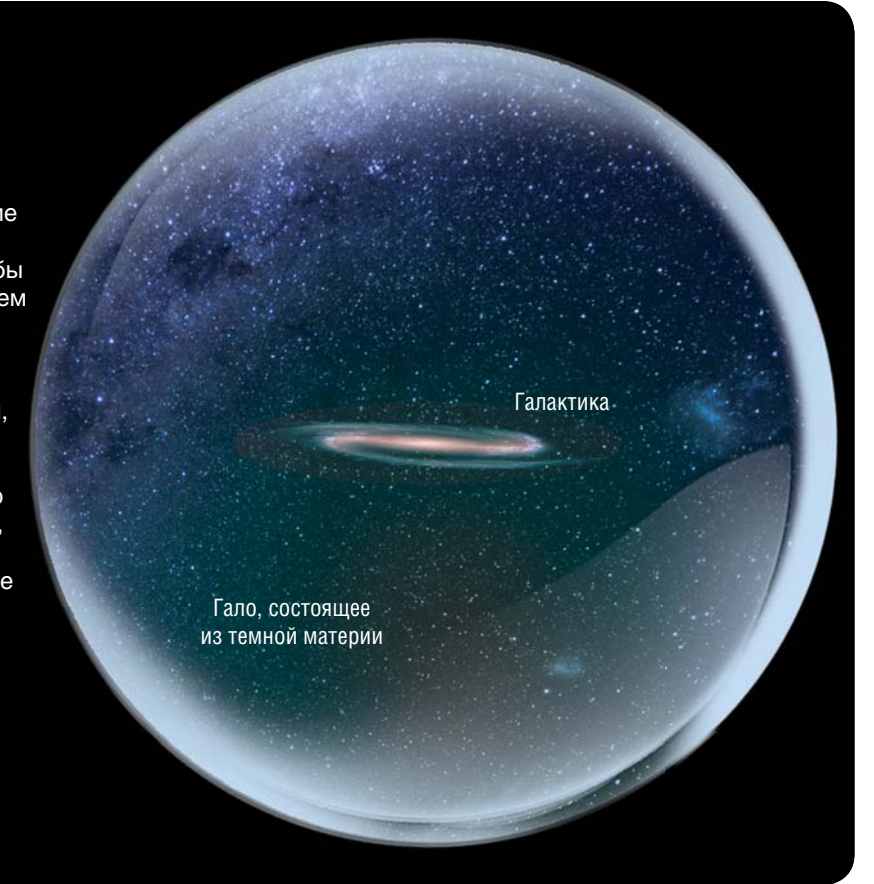
### Лишний вес Вселенной

В 1933 г. швейцарско-американский астроном Фриц Цвикки заметил, что кроме светящегося вещества галактик во Вселенной должны быть еще невидимые, «скрытые» массы, которые проявляют себя только своим тяготением. Он изучал скопление галактик Кома в созвездии Волосы Вероники — крупное образование, содержащее тысячи звездных систем, подобных туманности Андромеды или нашей Галактике. Галактики движутся в этом скоплении со скоростями, достигающими 1000 км/с. 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, требуются дополнительные массы,

которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы галактик скопления.

Позднее, в 1970-х гг., усилиями астрономов СССР и США было обнаружено, что скрытые массы должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в изолированных крупных галактиках. Ян Эйнасто, Вера Рубин, Джеремайя Острайкер, Джим Пиблс и их коллеги выяснили, что скрытые массы образуют невидимые *гало* галактик. Дело в том, что можно измерить зависимость скорости вращения спиральных галактик от расстояния до центра (*кривая вращения*), которое прослеживается как внутри звездной системы, так и вне ее (по движению облаков нейтрального водорода). В области вне видимого диска галактики кривая вращения становится, как правило, плоской, т.е. практически не зависит от расстояния. Во всех случаях ход этой «плоской» зависимости указывает на присутствие скрытой материи и внутри звездной системы, и вне ее, причем масса невидимой материи в гало в 3—10 раз больше массы галактики.

Наблюдаемые локальные (в системе центра масс) скорости галактик в скоплениях слишком велики, чтобы их можно было объяснить тяготением только видимой, светящейся материи. Для удержания их в объеме скопления требуются дополнительные, «скрытые» массы, которые на порядок превосходят видимую массу самих галактик. Сказанное относится и к вращению крупных галактик, таких, например, как туманность Андромеды. Невидимое вещество, наполняющее сферические гало галактик и скоплений, принято называть *темной материей*



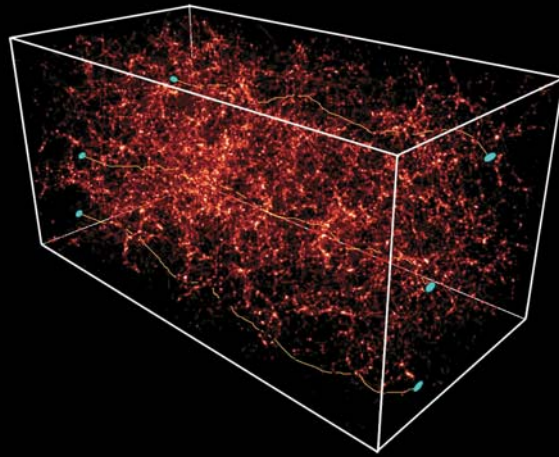
Эти гало имеют почти сферическую форму, их радиусы в 5—10 раз превышают размеры самих звездных систем. Такие крупные галактики, как, скажем, туманность Андромеды или наша Галактика, состоят из звездного диска, погруженного в распределение невидимой массы, которое простирается на расстояния до 100 кпк. Эти темные гало, как и дополнительные массы у Цвикки, проявляют себя исключительно тяготением. Невидимое вещество, наполняющее гало галактик и скоплений, принято сейчас называть *темной материей*.

Другие интересные эмпирические данные, подтверждающие существование темной материи, связаны с эффектом *гравитационной линзы*. Скопления галактик создают эйнштейновский эффект отклонения 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, когда угловое расстояние между линзой и источником относительно невелико. При сравнительно больших угловых расстояниях иска-

жение 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 скрытые массы.

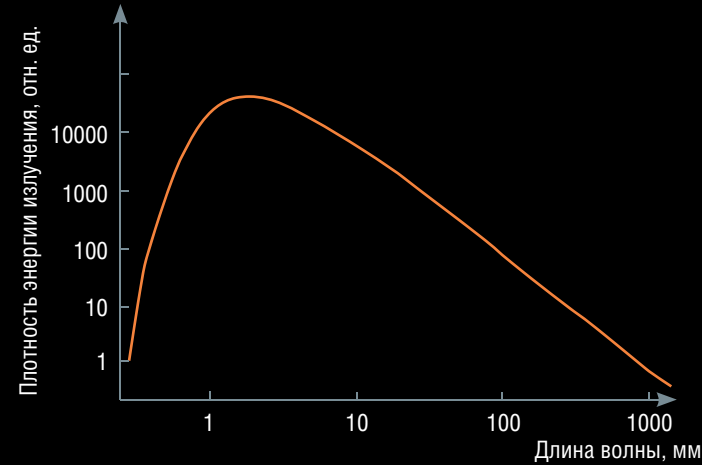
Открытие темной материи — второе (после открытия космологического расширения) важнейшее событие в истории космологии. Обычное вещество, из которого состоит планета Земля (и все, что на ней, включая и нас самих), Солнце, другие звезды, складывается всего из трех видов элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. А темная материя, которой во Вселенной гораздо больше, имеет совсем другой состав: это не барионы (протоны и нейтроны), не электроны, а... неизвестно что.

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.



Темная материя может заявлять о себе, деформируя изображения далеких объектов наподобие искажений, вносимых старым стеклом. Можно оценить распределение темной материи, которая вызывает эти искажения. При сильном гравитационном линзировании искажение столь значительно, что появляется несколько изображений источника. Слабое линзирование сводится только к изменению видимой формы источника. Недавно были получены результаты обработки снимков 200 тыс. галактик, сделанных Канадско-франко-гавайским телескопом. Здесь представлен пример компьютерного моделирования распределения темной материи (показана красным цветом), которая искривляет световые лучи от далеких галактик и искажает их форму.

Автор С. Коломби  
(Парижский астрофизический институт)



В 1965 г. радиоастрономы Лаборатории фирмы «Белл» Арно Пензиас и Роберт Вилсон обнаружили космическое реликтовое излучение. Максимум в спектре этого излучения лежит в миллиметровом диапазоне. Положение максимума отвечает температуре  $T = 2,7$  К. Это открытие, удостоенное впоследствии Нобелевской премии, было сделано случайно: по признанию Вилсона, ни он, ни его коллега не думали о космологии и даже ничего не слышали о ней, когда зарегистрировали в своей антенне неустранимый изотропный сигнал, который они приняли за инструментальный шум. Смысл происшедшего прояснили физики-теоретики Принстонского университета

Они вышли из равновесия с веществом, когда возраст мира был меньше одной секунды, и с тех пор присутствуют в космосе, взаимодействуя с остальными видами энергии практически только гравитационно. Их должно быть в среднем около 300 в каждом кубическом сантиметре пространства. В начале 1980-х гг. казалось, что лабораторный физический эксперимент позволяет этим

частицам иметь массы, подходящие для того, чтобы нейтрино могли играть роль темной материи. Сейчас, однако, стало ясно, что массы нейтрино значительно меньше, так что

на них можно списать в лучшем случае примерно 10% темной материи. Каковы же тогда основные носители этой субстанции?

Одна из современных гипотез, выросшая из идеи Зельдовича, заключается в том, что темная материя состоит в основном из частиц, в некотором смысле очень похожих на нейтрино: они стабильны,

не имеют электрического заряда и участвуют только в гравитационном и слабом взаимодействиях. Однако такие частицы сильно отличаются от нейтрино по массе: они должны быть очень тяжелыми, примерно в 1000 раз тяжелее протона, так что энергия покоя такой частицы составляет около 1 ТэВ. 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 предсказанию: в природе должны существовать массивные стабильные слабовзаимодействующие элементарные частицы, на долю которых приходится примерно 25% всей массы и энергии Вселенной, что в 4–5 раз больше, чем вклад барионов.

Возможно, нужные по свойствам новые частицы будут обнаружены на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе, который готовится к проведению небывалых экспериментов. На этом мощнейшем ускорителе пучки протонов и ионов будут разгоняться до энергий более 10 ТэВ, что заметно превышает энергию покоя гипотетических темных частиц. В нескольких крупных лабораториях мира, в том числе и в России, строятся специальные установки для детектирования частиц темной материи, приходящих на Землю из гало нашей Галактики. Не исключено, что вопрос о физической природе темной материи будет решен уже в недалеком будущем. Во всяком случае эта загадка не кажется такой безнадежной, как природа космологического расширения.

## Фон фотонов

В 1965 г. американские радиоастрономы Арно Пензиас и Роберт Вилсон обнаружили, что вся Вселенная пронизана электромагнитным излучением, приходящим на Землю изотропно, т.е. равномерно со всех направлений. Это третье из крупнейших открытий в космологии.

Максимум в спектре этого излучения приходится на миллиметровые волны, причем сам спектр, т.е. распределение по длинам волн (или частотам), совпадает по форме со спектром абсолютно черного тела. На языке квантов можно сказать, что в мире имеется газ фотонов, которые равномерно заполняют все пространство. Температура этого газа точно измерена:  $T = 2,725$  К. Как видим, это очень низкая температура, она не выше трех градусов, считая от абсолютного нуля (по шкале Цельсия это  $-270^\circ$ ). Таких космических фотонов очень много во Вселенной: их почти в 10 млрд раз больше, чем протонов, если считать по числу частиц. В кубическом сантиметре пространства содержится примерно 500 реликтовых фотонов.

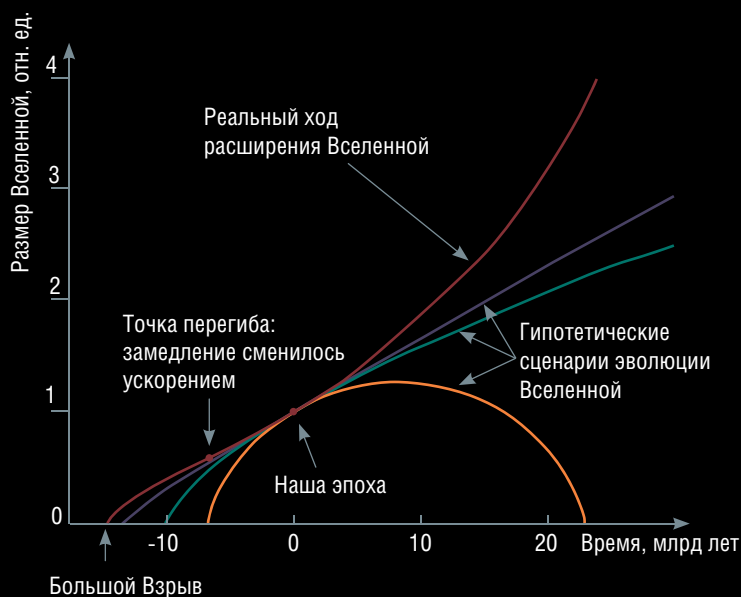
Само по себе изотропное космическое излучение не таит никаких особенных загадок. Это реликт, т.е. остаток, того состояния, в котором Вселенная находилась в очень далеком прошлом, в первые минуты своего расширения. В те времена в ней не было ни звезд, ни галактик, а все вещество распределялось в пространстве более или менее равномерно. Это можно себе представить, если мысленно обратить ход времени: глядя назад, мы увидим, что галактики не разбегаются, а сближаются между собой. И в определенный момент они должны перемешаться, так что

их вещество окажется газом приблизительно однородной плотности. Этот газ должен быть очень горячим. Еще со школьной скамьи мы знаем, что при расширении тела охлаждаются, а при сжатии — нагреваются. Из физики известно также, что в горячей газе должны обязательно иметься фотоны, находящиеся с газом в термодинамическом равновесии. При расширении Вселенной фотоны не исчезают и должны сохраниться до современной эпохи.

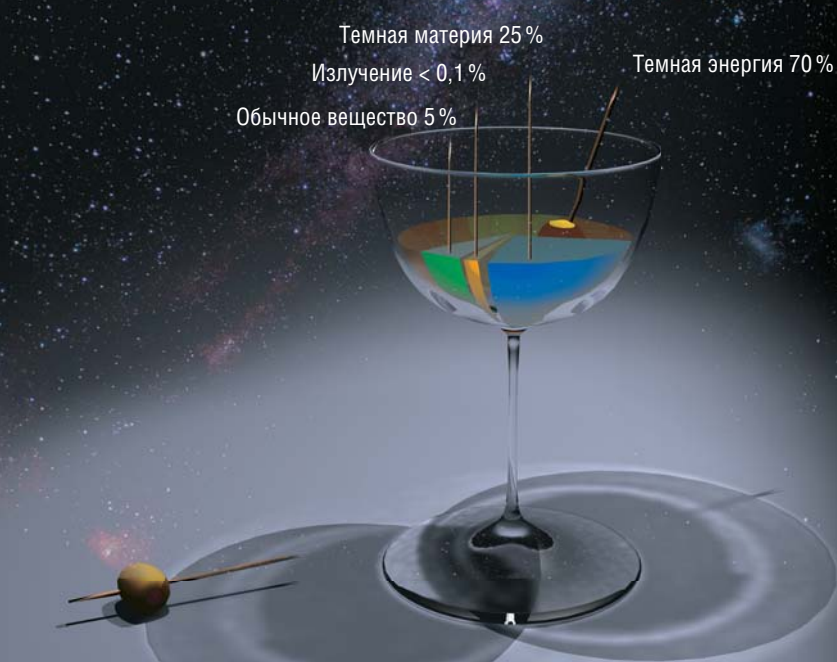
Так рассуждал еще в 1940-х гг. Георгий Гамов, некогда студент профессора Фридмана в Ленинграде. Он построил теорию «горячей Вселенной», которую называют еще теорией Большого Взрыва, и на ее основе смог предсказать само существование этого остаточного, *реликтового излучения*. Более того, он предсказал и нынешнюю температуру реликтовых фотонов. По его расчетам, она не должна превышать 10 К. В одной из научно-популярных статей (в 1950 г.) Гамов написал, что температура должна быть примерно три градуса абсолютной шкалы. Как выяснилось через полтора десятка лет, предсказание оказалось очень точным. Многие считают, что это было самое красивое количественное предсказание во всей космологической теории.

Но кое-что не до конца ясно и с реликтовым излучением. Космологам не удается понять, почему реликтовых фотонов так много (по сравнению с протонами). Впрочем, правильнее было бы сказать, что это вопрос не о фотонах, а, скорее, о протонах: почему их именно столько, сколько известно из наблюдений? Ответа пока нет. С этой проблемой не удалось справиться даже А.Д. Сахарову, который считал ее одной из самых принципиальных как в космологии, так и во всей фундаментальной физике.

СОГЛАСНО ОДНОЙ ИЗ ГИПОТЕЗ, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ СОСТОИТ ИЗ ЧАСТИЦ, ПОХОЖИХ НА НЕЙТРИНО. ОДНАКО ТАКИЕ ЧАСТИЦЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ПРИМЕРНО В 1000 РАЗ ТЯЖЕЛЕЕ ПРОТОНА



Если бы во Вселенной присутствовало только обычное тяготение, разбегание галактик замедлялось бы со временем (подобно тому, как тормозится брошенный вверх камень). Однако в 1998—1999 гг. было установлено, что по крайней мере вторую половину своей истории Вселенная расширяется, наоборот, с ускорением. Этот факт свидетельствует в пользу существования антитяготения — всеобщего отталкивания. Новая энергия получила название «темной энергии». На рисунке показаны различные сценарии эволюции мира, в принципе допускаемые теорией. Наблюдения последнего десятилетия позволили выбрать вариант, который действительно реализуется, — ему соответствует красная кривая. В этом случае от начала космологического расширения до современной эпохи проходит приблизительно 14 млрд лет. При этом космологическое расширение происходит с замедлением первые 7 млрд лет, после этого расширение ускоряется



«Энергетический коктейль» современной Вселенной замешан по странному рецепту: в нем очень много «темного»

**ГЕОРГИЙ ГАМОВ (1904—1968)** ЗА 15 ЛЕТ ДО ОТКРЫТИЯ ПЕНЗИАСА И ВИЛСОНА ПРЕДВИДЕЛ, ЧТО ТЕМПЕРАТУРА РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДОЛЖНА БЫТЬ ОКОЛО ТРЕХ ГРАДУСОВ. ЭТО БЫЛО САМОЕ ТОЧНОЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ В КОСМОЛОГИИ

Открытие и изучение реликтового излучения отмечено двумя Нобелевскими премиями. Первая присуждена в 1978 г. Пензиасу и Вилсону, вторая — в 2006 г. Джорджу Смуту и Джону Матеру, которые в 1992 г. доказали, что реликтовое излучение — это действительно термодинамически равновесный газ фотонов определенной температуры. 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.

В наши дни наблюдения реликтового излучения служат астрономам для изучения крупномасштабных свойств Вселенной. Самый яркий результат, достигнутый на этом пути в последние годы, касается геометрии трехмерного пространства, в котором происходит разбегание галактик. Начиная с Фридмана, космологи стремились выяснить тип геометрии реального пространства. Оказалось, что это обычная школьная евклидова геометрия. Выходит, наш мир устроен не слишком сложно: по крайней мере его пространственная геометрия — самая простая из возможных.

### Всемирное антитяготение

В 1998—1999 гг. две международные группы наблюдателей, одной

из которых руководили Брайан Шмидт и Адам Райсс, а другой — Сол Перлматтер, установили, что наблюдаемое космологическое расширение происходит с ускорением: скорости удаления галактик возрастают со временем. 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. Из-за исключительной яркости сверхновые можно наблюдать на очень больших, истинно космологических расстояниях, составляющих тысячи мегапарсек.

Вещество (считая и с темной материей) не способно ускорять галактики, а лишь тормозит их разлет: взаимное притяжение 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 особая космическая масса, или энергия, которая со-

здает не тяготение, а *антитяготение* — всеобщее отталкивание тел. При этом в космологическом масштабе антитяготение сильнее тяготения. Новая энергия получила название *темной энергии*. Она действительно невидима: не излучает, не рассеивает и не поглощает света (и всех вообще электромагнитных



волн); она проявляет себя только антитяготением.

Астрономы выяснили, что до расстояний примерно в 7 млрд световых лет космологическое ускорение положительно. Но на еще более далеких расстояниях ускорение, как оказалось, меняет знак: там оно отрицательно, а значит, на этих сверхбольших расстояниях космологическое расширение происходит с замедлением.

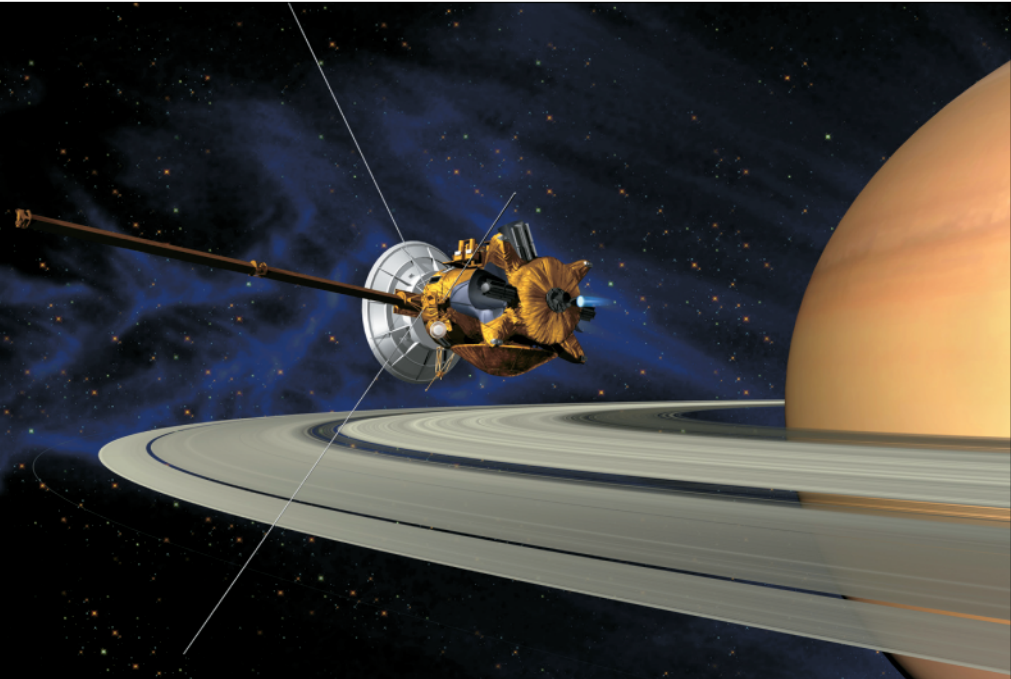
Примем теперь во внимание, что свет распространяется в пространстве с конечной скоростью. Это означает, что мы видим объекты такими, какими они были,

Альберт Эйнштейн (1879—1955), снимок 1920 г. Тремя годами ранее он выдвинул идею всеобщего космического отталкивания. Эйнштейн показал, что наряду со всемирным тяготением — взаимным притяжением тел — в природе может, в принципе, существовать и всемирное антитяготение, которое стремится заставить все тела двигаться прочь друг от друга. Антитяготение было открыто в 1998—1999 гг.

когда испустили принимаемый нами сейчас свет. Солнце мы видим с задержкой в 8 мин, далекие галактики наблюдаем такими, какими они были миллиарды лет назад. Телескоп — это настоящая машина времени, позволяющая воочию видеть прошлое мира. Возраст мира составляет 13,7 млрд лет — таковы самые свежие космологические данные.

Сказанное только что о космологическом ускорении означает, что первую половину своей истории Вселенная расширялась с замедлением, а вторую — с ускорением. Первые 7 млрд лет расширяющаяся Вселенная практически не чувствовала присутствия в ней темной энергии: плотность вещества (темной материи и барионов) была значительно выше плотности темной энергии. Предполагается, 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; по этой причине до определенного момента тяготение вещества было сильнее антитяготения

В отношении расчета движения в пределах Солнечной системы общая теория относительности Эйнштейна давно стала почти инженерной наукой. Так, полеты автоматических космических аппаратов к планетам немислимы без ОТО. На рисунке — американский зонд «Кассини», достигший в 2004 г. Сатурна. С сайта [saturn.jpl.nasa.gov](http://saturn.jpl.nasa.gov)



Космический телескоп «Хаббл» (КТХ) — самый крупный астрономический инструмент, выведенный на орбиту вокруг Земли. Диаметр зеркала КТХ составляет 2,4 м; оно почти такое же по размеру, как в свое время у Эдвина Хаббла. Но космическому телескопу не мешает земная атмосфера, а совершенная светоприемная аппаратура на нем такова, что в дело идет практически каждый квант света, упавший на зеркало. Самое замечательное открытие, сделанное с помощью КТХ, — обнаружение темной энергии во Вселенной. Фото Европейского космического агентства

темной энергии. Эти две силы как раз и сравнялись по величине примерно 7 млрд лет тому назад. С тех пор темная энергия доминирует, и эта эпоха антитяготения будет длиться неограниченно долго.

По совокупности различных наблюдений (включая и наблюдения реликтового излучения)

к настоящему времени установлена доля каждого космического компонента в общем энергетическом балансе Вселенной. Эти компоненты сейчас называют видами

космической энергии. На долю темной энергии приходится примерно 70% всей энергии мира; на темную материю — 25%; на обычное вещество (протоны, нейтроны, электроны) — около 5%; на реликтовое излучение — менее 0,1%. Таков рецепт «энергетической смеси», заполняющей современную Вселенную. В ней, как мы видим, много «темного»

— до 95%. Это стало самой большой неожиданностью для астрономов, космологов и физиков.

Удивительно и достойно восхищения научное предвидение Эйнштейна: еще в 1917 г. он говорил о всеобщем космическом отталкивании как о возможном физическом феномене космологического масштаба. У Эйнштейна антитяготение описывается всего одной константой, которую называют космологической постоянной. Весь комплекс имеющихся сейчас наблюдательных данных о темной энергии прекрасно согласуется с таким описанием.

Эйнштейн не оставил нам физической интерпретации космологической постоянной. 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, она одна и та же во всех системах отсчета. Из этого представления вытекают особые макроскопические свойства темной энергии. Так, оказывается, что у нее имеется давление, причем оно отрицательно, а по абсолютной величине равно плотности энергии (напомним, что плотность энергии и давление имеют одну и ту же размерность). Именно из-за своего отрицательного давления темная энергия создает антитяготение — это специфический эффект общей теории относительности.

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

гии, Зельдович обсуждал возможную связь между космологической постоянной и квантовым вакуумом элементарных частиц и физических полей. Этот физический вакуум не есть абсолютная пустота, он имеет свою отличную от нуля энергию. Ее носителями служат так называемые нулевые колебания квантовых полей, всегда существующие в пространстве даже 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 давлением и плотностью должна быть в точности такой, как и у темной энергии, описываемой эйнштейновской космологической постоянной. Так не тождественна ли темная энергия физическому вакууму?

Было бы замечательно, если бы удалось доказать, что это действительно так: объединение кажущихся разными сущностей — плодотворнейший путь развития науки. Это известно еще со времен Максвелла, объединившего электричество и магнетизм. Но до сих пор идею Зельдовича не удается ни доказать, ни опровергнуть. Физическая природа и микроскопическая структура темной энергии стала сейчас центральной проблемой космологии и всей фундаментальной физики. Похоже, она столь же сложна, как и вопрос о происхождении космологического расширения.

Итак, за 90 лет своего существования, считая от первых наблюдений Слайфера и теоретической работы Эйнштейна, космология превратилась из области абстрактных и почти

фантастических, как 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 нем 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. Она дает широкую, богатую и согласованную картину мира, которая становится сейчас неотъемлемой частью общей культуры человечества. А нерешенные проблемы в живой, сложной науке всегда есть и должны быть — это источник и резерв ее дальнейшего развития.

*Литература*

Вейнберг С. Первые три минуты. — М.: Атомиздат, 1982.  
 Новиков И. Д., Шаров А. С. Человек, открывший взрыв Вселенной. — М.: Наука, 1989.  
 Розенталь И. Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. — М.: Недра, 1984.  
 Тронн Э. А., Френкель В. Я., Чернин А. Д. Александр Александрович Фридман. Труды и жизнь. — М.: Наука, 1988.  
 Черепашук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. — Фрязино: Век-2, 2003.  
 Черепашук А. М., Чернин А. Д. Горизонты Вселенной. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.

АНТИТЯГОТЕНИЕ СОЗДАЕТСЯ НЕ ГАЛАКТИКАМИ ИЛИ ДРУГИМИ КОМПАКТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ, А НЕПРЕРЫВНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ, В КОТОРУЮ ВСЕ ТЕЛА ПОГРУЖЕНЫ, — ТЕМНОЙ ЭНЕРГИЕЙ