

ВЛАДИМИР ЛУКАШ, доктор физико-математических наук  
ЕЛЕНА МИХЕЕВА, кандидат физико-математических наук

# Темная энергия ВСЕЛЕННОЙ

В последнее время в космологии — науке, которая изучает структуру и эволюцию Вселенной, — стал широко применяться термин «темная энергия», вызывающий у людей, далеких от этих исследований, по меньшей мере легкое недоумение. Часто в паре с ним выступает и другой «мрачный» термин — «темная материя», а также упоминается, что, по данным наблюдений, эти две субстанции обеспечивают 95% полной плотности Вселенной. Прольем же луч света на это «царство мрака».

**В** научной литературе термин «темная энергия» появился в конце прошлого века для обозначения физической среды, заполняющей всю Вселенную. В отличие от различных видов вещества и излучения, от которых можно (хотя бы теоретически) полностью очистить или экранировать некоторый объем, темная энергия в современной Вселенной неразрывно связана с каждым кубическим сантиметром пространства. С некоторой натяжкой можно сказать, что само пространство обладает массой и участвует в гравитационном взаимодействии. (Напомним, что согласно известной формуле  $E = mc^2$  энергия эквивалентна массе.)

Первое слово в термине «темная энергия» указывает на то, что эта форма материи не испускает и не поглощает никакого электромагнитного излучения, в частности света. С обычным веществом она взаимодействует только через гравитацию. Слово же «энергия» противопоставляет эту среду структурированной, то есть состоящей из частиц, материи, подчеркивая, что она не участвует в процессе гравитационного сжатия, ведущего к образованию галактик и их скоплений. Иными словами, плотность темной энергии, в отличие от обычного и темного вещества, одинакова во всех точках пространства.

Во избежание путаницы сразу отметим, что мы исходим из материалистического представления об окружающем нас мире, а значит, все, что заполняет Вселенную, — это материя. Если материя структурирована, ее называют веществом, а если нет, как, например, поле, то — энергией. Вещество, в свою очередь, делят на обычное и темное, ориентируясь на то, взаимодействует ли оно с электромагнитным излучением. Правда, по сложившейся в космологии традиции темное

вещество принято называть «темной материей». Энергия тоже делится на два типа. Один из них — это как раз излучение, еще одна субстанция, наполняющая Вселенную. Когда-то именно излучение определяло эволюцию нашего мира, но сейчас его роль упала почти до абсолютного нуля, точнее до 3 градусов Кельвина — температуры так называемого реликтового микроволнового излучения, идущего в космосе со всех сторон. Это остаток (реликт) горячей молодости нашей Вселенной. А вот о другом типе энергии, который не взаимодействует ни с веществом, ни с излучением и проявляет себя исключительно гравитационно, мы бы могли никогда не узнать, если бы не исследования в области космологии.

С излучением и обычным веществом, состоящим из атомов, мы постоянно имеем дело в повседневной жизни. Гораздо меньше мы знаем о темной материи. Тем не менее достаточно надежно установлено, что ее физическим носителем являются некие слабовзаимодействующие частицы. Известны даже некоторые свойства этих частиц, например, что у них есть масса, а движутся они много медленнее света. Однако они никогда еще не регистрировались искусственными детекторами.

### САМАЯ БОЛЬШАЯ ОШИБКА ЭЙНШТЕЙНА

Вопрос о природе темной энергии еще туманнее. Поэтому, как часто бывает в науке, отвечать на него лучше, описывая предысторию вопроса. Она начинается в памятном для нашей страны 1917 году, когда создатель общей теории относительности Альберт Эйнштейн, публикуя решение задачи об эволюции Вселенной, ввел в научный оборот понятие космологической постоянной. В своих

уравнениях, описывающих свойства гравитации, он обозначил ее греческой буквой «лямбда» ( $\Lambda$ ). Так она получила свое второе название — лямбда-член. Назначение космологической постоянной состояло в том, чтобы сделать Вселенную стационарной, то есть неизменной и вечной. Без лямбда-члена уравнения общей теории относительности предсказывали, что Вселенная должна быть неустойчивой, как воздушный шарик, из которого вдруг исчез весь воздух. Всерьез изучать такую неустойчивую Вселенную Эйнштейн не стал, а ограничился тем, что восстановил равновесие введением космологической постоянной.

Однако позднее, в 1922—1924 годах, наш выдающийся соотечественник Александр Фридман показал, что в судьбе Вселенной космологическая постоянная не может играть роль «стабилизатора», и рискнул рассмотреть неустойчивые модели Вселенной. В результате ему удалось найти еще не известные к тому времени нестационарные решения уравнений Эйнштейна, в которых Вселенная как целое сжималась или расширялась.

В те годы космология была сугубо умозрительной наукой, пытавшейся чисто теоретически применить физические уравнения ко Вселенной как целому. Поэтому решения Фридмана поначалу были восприняты — в том числе и самим Эйнштейном — как математическое упражнение. Вспомнили о нем после открытия разбега галактик в 1929 году. Фридмановские решения прекрасно подошли для описания наблюдений и стали важнейшей и широко используемой космологической моделью. А Эйнштейн позднее назвал космологическую постоянную своей «самой большой научной ошибкой». ▶



NASA, SWIFT, S. IMMELER

В 2005 году сверхновую типа Ia впервые наблюдали в трех диапазонах: видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском. Такие наблюдения важны для уточнения физических моделей вспышек сверхновых, по которым оценивают расстояния до далеких галактик

## ДАЛЕКИЕ СВЕРХНОВЫЕ

Постепенно наблюдательная база космологии становилась все более мощной, а исследователи учились не только задавать вопросы природе, но и получать на них ответы. И вместе с новыми результатами росло и число аргументов в пользу реального существования «самой большой научной ошибки» Эйнштейна. В полный голос об этом заговорили в 1998 году после наблюдения далеких сверхновых звезд, которые указывали, что расширение Вселенной ускоряется. Это означало, что во Вселенной действует некая расталкивающая сила, а значит, и соответствующая ей энергия, похожая по своим проявлениям на эффект от лямбда-члена в уравнениях Эйнштейна. По сути, лямбда-член представляет собой математическое описание простейшего частного случая темной энергии.

Напомним, что согласно наблюдениям космологическое расширение подчиняется закону Хаббла: чем больше расстояние между двумя галактиками, тем быстрее они удаляются друг от друга, причем скорость, определяемая по красному смещению в спектрах галактик, прямо пропорциональна расстоянию. Но до недавнего времени закон Хаббла был непосредственно проверен лишь на относительно небольших расстояниях — тех, что удавалось более или менее точно измерить. О том, как расширялась Вселенная в далеком прошлом, то есть на больших расстояниях, можно было судить только по косвенным наблюдательным данным. Заняться прямой

проверкой закона Хаббла на больших расстояниях удалось лишь в конце XX века, когда появился способ определять расстояния до далеких галактик по вспыхивающим в них сверхновым звездам.

Вспышка сверхновой — это момент в жизни массивной звезды, когда она испытывает катастрофический взрыв. Сверхновые бывают разных типов в зависимости от конкретных обстоятельств, предшествующих катаклизму. При наблюдениях тип вспышки определяют по спектру и форме кривой блеска. Сверхновые, получившие обозначение Ia, возникают при термоядерном взрыве белого карлика, масса которого превысила пороговое значение  $\sim 1,4$  массы Солнца, называемое пределом Чандрасекара. Пока масса белого карлика меньше порогового значения, сила гравитации звезды уравновешивается давлением вырожденного электронного газа. Но если в тесной двойной системе с соседней звезды на него перетекает вещество, то в определенный момент электронное давление оказывается недостаточным и звезда взрывается, а астрономы регистрируют еще одну вспышку сверхновой типа Ia. Поскольку пороговая масса и причина, по которой белый карлик взрывается, всегда одинаковы, такие сверхновые в максимуме блеска должны иметь одинаковую, причем весьма большую светимость и могут служить «стандартной свечой» для определения межгалактических расстояний. Если собрать данные по многим таким сверхновым и сравнить расстояния до них с красными смещениями галактик, в

которых случались вспышки, то можно определить, как менялся в прошлом темп расширения Вселенной, и подобрать соответствующую космологическую модель, в частности подходящую величину лямбда-члена (плотности темной энергии).

Однако несмотря на простоту и ясность этого метода, он сталкивается с рядом серьезных трудностей. Прежде всего отсутствие детальной теории взрыва сверхновых типа Ia делает зыбким их статус стандартной свечи. На характер взрыва, а значит, и на светимость сверхновой могут влиять скорость вращения белого карлика, химический состав его ядра, количество водорода и гелия, перетекшего на него с соседней звезды. Как все это сказывается на кривых блеска, пока достоверно неизвестно. Наконец, сверхновые вспыхивают не в пустом пространстве, а в галактиках, и свет вспышки может, к примеру, оказаться ослаблен случайным газопылевым облаком, встретившимся на пути к Земле. Все это ставит под сомнение возможность использования сверхновых в качестве стандартных свечей. И если бы в пользу существования темной энергии был только этот довод, данная статья вряд ли была бы написана. Так что хотя «аргумент сверхновых» спровоцировал широкую дискуссию о темной энергии (и даже появление самого этого термина), уверенность космологов в ее существовании опирается на другие, более убедительные аргументы. К сожалению, они не столь просты, и поэтому описать их можно лишь в самых общих чертах.

## КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВРЕМЕН

По современным представлениям, рождение Вселенной должно описываться в терминах еще не созданной квантовой теории гравитации. Понятие «возраст Вселенной» имеет смысл для моментов времени не раньше  $10^{-43}$  секунд. На меньших масштабах уже нельзя говорить о привычном нам линейном течении времени. Топологические свойства пространства тоже становятся нестабильными. По-видимому, в малых масштабах пространство-время заполнено микроскопическими «кротовыми норами» — своего рода тоннелями, соединяющими разнесенные области Вселенной. Впрочем, о расстояниях или порядке следования событий говорить тоже невозможно. В научной литературе такое состояние

пространства-времени с флуктуирующей топологией называют квантовой пеной. По неизвестным пока причинам, возможно, из-за квантовой флуктуации, в пространстве Вселенной возникает физическое поле, которое в возрасте около  $10^{-35}$  секунд заставляет Вселенную расширяться с колоссальным ускорением. Этот процесс называют инфляцией, а вызывающее его поле — инфлатоном. В отличие от экономики, где инфляция является неизбежным злом, с которым нужно бороться, в космологии инфляция, то есть экспоненциально быстрое увеличение Вселенной, — это благо. Именно ей мы обязаны тем, что Вселенная обрела большой размер и плоскую геометрию. В конце этой короткой эпохи ускоренного

расширения запасенная в инфлатоне энергия порождает известную нам материю: разогретую до огромной температуры смесь излучения и массивных частиц, а также едва заметную на их фоне темную энергию. Можно сказать, что это и есть Большой взрыв. Космологи говорят об этом моменте, как о начале радиационно-доминированной эпохи в эволюции Вселенной, поскольку большая часть энергии в это время приходится на излучение. Однако расширение Вселенной продолжается (хотя теперь уже и без ускорения) и оно по-разному отражается на основных типах материи. Ничтожная плотность темной энергии со временем не меняется, плотность вещества падает обратно пропорционально объему Вселенной,

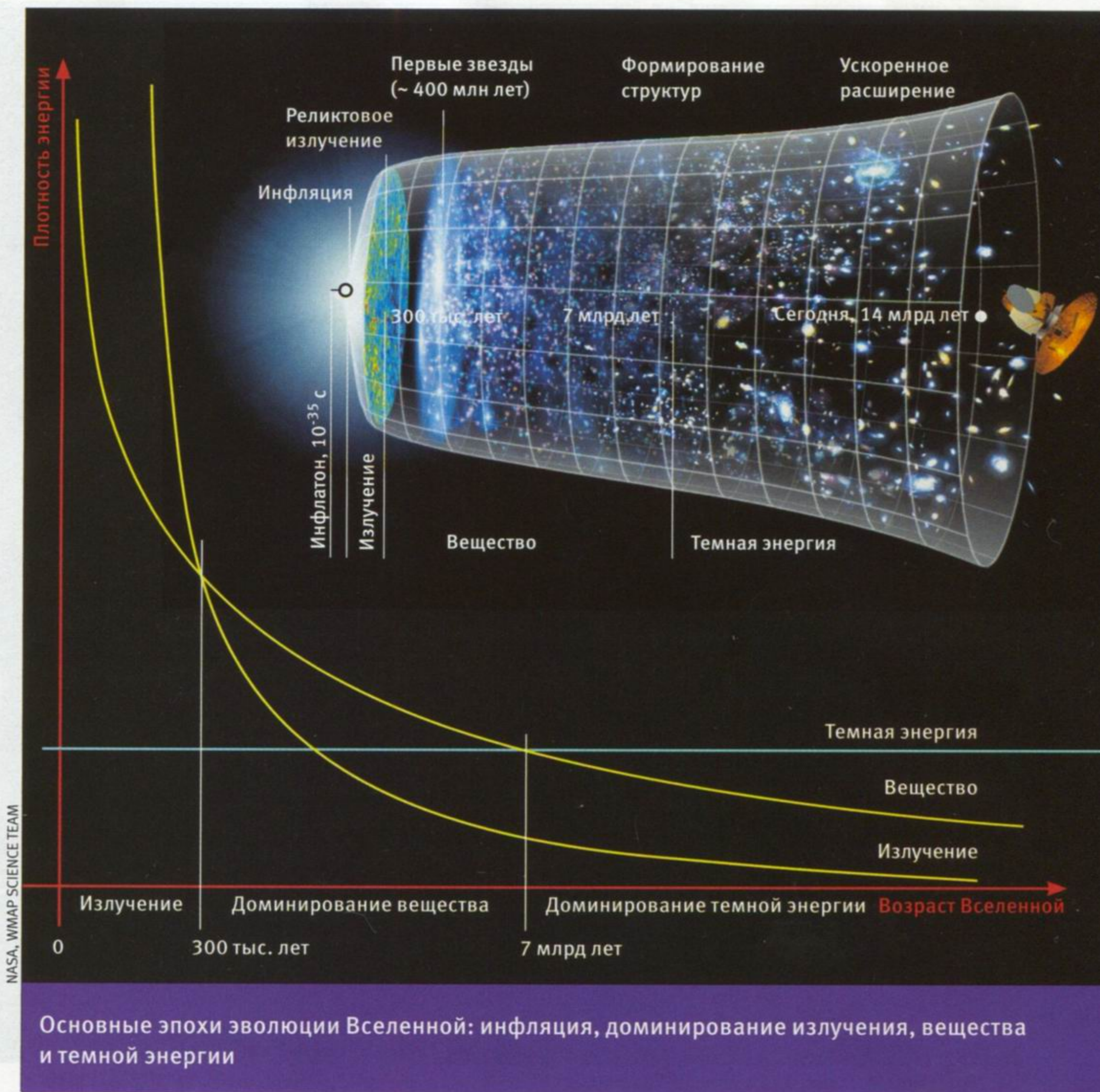
а плотность излучения снижается еще быстрее. В итоге спустя 300 тысяч лет доминирующей формой материи во Вселенной становится вещество, большую часть которого составляет темная материя. С этого момента рост возмущений плотности вещества, едва тлевший на стадии доминирования излучения, становится достаточно быстрым, чтобы привести к образованию галактик, звезд и столь необходимых человечеству планет. Движущей силой этого процесса является гравитационная неустойчивость, приводящая к сгущению вещества. Едва заметные неоднородности оставались еще с момента распада инфлатона, но пока во Вселенной доминировало излучение, оно мешало развитию неустойчивости.

## КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

У космологов имеются два основных источника знаний о крупномасштабной структуре Вселенной. Прежде всего это распределение в окружающем нас пространстве светящейся материи, то есть галактик. Трехмерная карта показывает, в какие структуры — группы, скопления, сверхскопления — объединяются галактики и каковы характерные размеры, формы и численность этих образований. Тем самым становится понятно, как распределено вещество в современной Вселенной.

Другим источником информации служит распределение интенсивности реликтового излучения по небесной сфере. Карта неба в микроволновом диапазоне несет информацию о распределении неоднородностей плотности в ранней Вселенной, когда ее возраст составлял около 300 тысяч лет — именно тогда вещество стало прозрачным для излучения. Угловые расстояния между пятнами на микроволновой карте говорят о размерах неоднородностей в то время, а перепады яркости (они, кстати, очень маленькие, порядка сотой доли процента) указывают на степень уплотнения зародышей будущих скоплений галактик. Тем самым у нас есть как бы два временных среза: структура Вселенной в моменты через 300 тысяч и 14 миллиардов лет после Большого взрыва.

Теория говорит о том, что характеристики наблюдаемых структур сильно зависят от того, какая часть



Основные эпохи эволюции Вселенной: инфляция, доминирование излучения, вещества и темной энергии

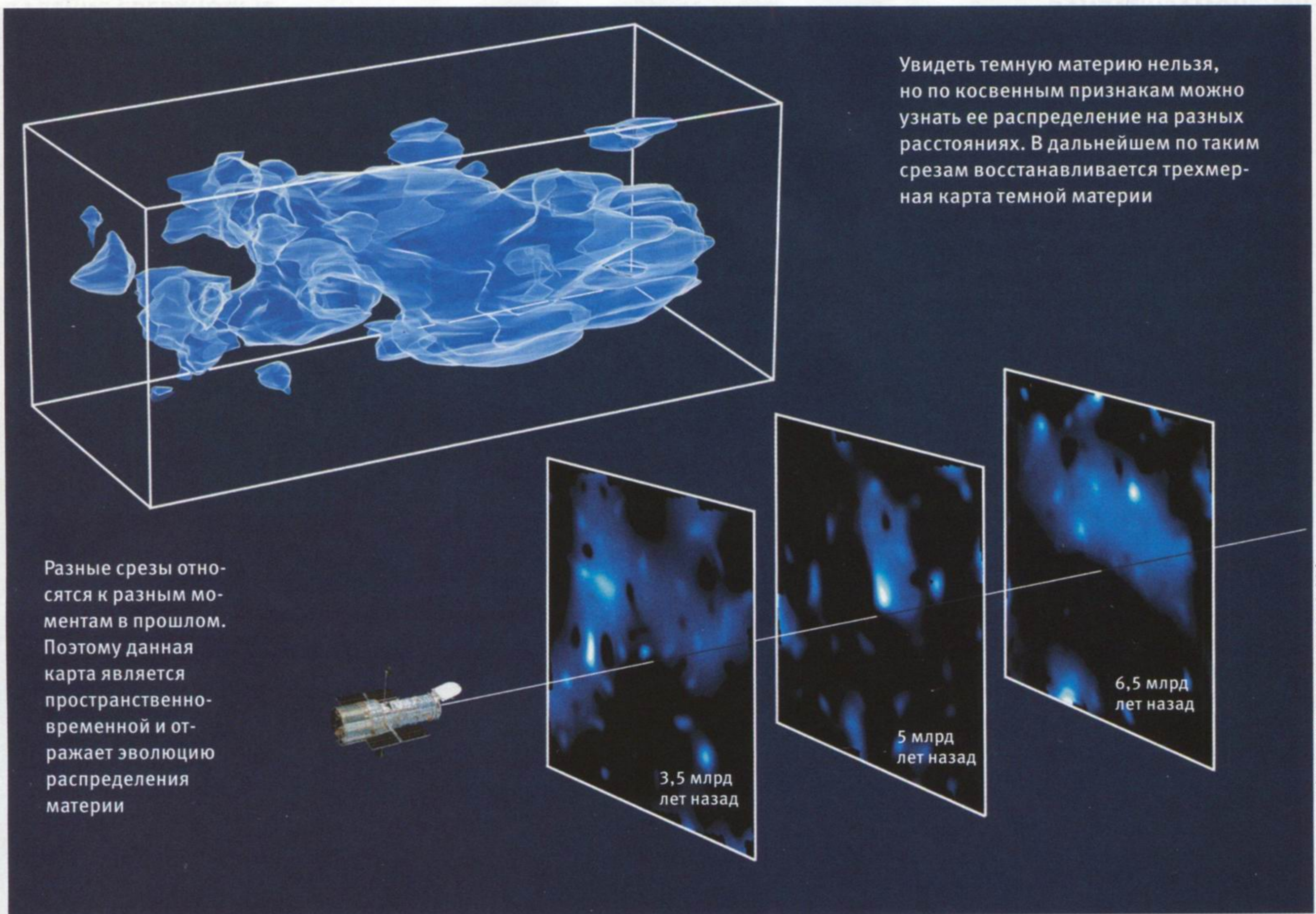
## Прообраз темной энергии Альберт Эйнштейн придумал еще в 1917 году, но потом назвал его своей «самой большой научной ошибкой»

Теперь основную роль начинает играть темная материя. Под действием собственной гравитации области повышенной плотности останавливаются в своем расширении и начинают сжиматься, в результате чего из темной материи образуются гравитационно-связанные системы, называемые гало. В гравитационном поле Вселенной образуются «ямы», в которые устремляется обычное вещество. Накапливаясь внутри гало, оно формирует галактики и их скопления. Этот процесс образования структур начался более 10 миллиардов лет назад и шел по нарастающей, пока не наступил последний перелом в эволюции Вселенной. Через 7 миллиардов лет (это примерно половина нынешнего возраста Вселенной)

плотность вещества, которая продолжала снижаться из-за космологического расширения, стала меньше плотности темной энергии. Тем самым завершилась эпоха доминирования вещества, и теперь темная энергия контролирует эволюцию Вселенной. Какова бы ни была ее физическая природа, проявляется она в том, что космологическое расширение вновь, как в эпоху инфляции, начинает ускоряться, только на этот раз очень медленно. Но даже этого достаточно, чтобы затормозить формирование структур, а в будущем оно должно вообще прекратиться: любые недостаточно плотные образования будут рассеиваться ускоряющимся расширением Вселенной. Временное «окно», в котором работает

гравитационная неустойчивость и возникают галактики, захлопнется уже через десяток миллиардов лет. Дальнейшая эволюция Вселенной зависит от природы темной энергии. Если это космологическая постоянная, то ускоренное расширение Вселенной будет продолжаться вечно. Если же темная энергия — это сверхслабое скалярное поле, то после того как оно достигнет состояния равновесия, расширение Вселенной станет замедляться, а возможно сменится сжатием. Пока физическая природа темной энергии неизвестна, все это не более чем умозрительные гипотезы. Таким образом, с определенностью сказать можно только одно: ускоренное расширение Вселенной будет продолжаться еще

несколько десятков миллиардов лет. За это время наш космический дом — галактика Млечный Путь — сольется со своей соседкой — Туманностью Андромеды (и большинством галактик-спутников меньшей массы, входящих в состав Местной Группы). Все прочие галактики улетят на большие расстояния, так что многие из них нельзя будет увидеть даже в самый мощный телескоп. Что касается реликтового излучения, которое приносит нам так много важнейшей информации о структуре Вселенной, то его температура упадет почти до нуля, и этот источник информации будет потерян. Человечество останется Робинзоном на острове с эфемерной перспективой обзавестись хотя бы Пятницей.



Увидеть темную материю нельзя, но по косвенным признакам можно узнать ее распределение на разных расстояниях. В дальнейшем по таким срезам восстанавливается трехмерная карта темной материи

Разные срезы относятся к разным моментам в прошлом. Поэтому данная карта является пространственно-временной и отражает эволюцию распределения материи

NASA, ESA, R. MASSEY (CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

## Для изучения темной энергии надо знать распределение темной материи, которая исследуется косвенными методами

материи во Вселенной приходится на вещество (обычное и темное). Расчеты, основанные на наблюдательных данных, показывают, что его доля составляет сегодня около 30% (из которых лишь 5% приходится на обычное вещество, состоящее из атомов). А значит, остальные 70% — это материя, не входящая ни в какие структуры, то есть темная энергия. Этот аргумент не столь прозрачен, поскольку за ним стоят сложные расчеты, описывающие образования структур во Вселенной. Тем не менее он действительно более сильный. Это можно проиллюстрировать такой аналогией. Представьте, что внеземная цивилизация стремится обнаружить разумную жизнь на Земле. Одна группа исследователей заметила идущее от нашей планеты мощное радиоизлучение, которое периодически изменяет частоту и интенсивность, и объясняет это работой электронного оборудования. Другая группа послала к Земле зонд и сфотографировала квадраты полей, линии дорог, узлы городов. Первый аргумент, конечно, проще, но второй — убедительнее.

Продолжая эту аналогию, можно сказать, что еще более наглядным свидетельством разумной жизни стало бы наблюдение за формированием перечисленных структур. Конечно, человеку пока не под силу в реальном времени наблюдать, как формируются скопления галактик. Тем не менее можно определить, как менялось их число по ходу эволюции Вселенной. Дело в том, что в силу конечности скорости света наблюдение объектов на больших расстояниях эквивалентно заглядыванию в прошлое. Темп образования галактик и их скоплений определяется скоростью роста возмущений плотности, которая, в свою очередь, зависит от параметров космологической модели, в частности от соотношения вещества и темной энергии. Во Вселенной с большой долей темной энергии возмущения растут медленно, а значит, сегодня скоплений галактик должно быть ненамного больше, чем в прошлом, и с расстоянием их число будет убывать медленно. Напротив, во Вселенной без темной энергии количество скоплений довольно быстро

сокращается с углублением в прошлое. Выяснив из наблюдений темп появления новых скоплений галактик, можно получить независимую оценку плотности темной энергии.

Есть и другие независимые наблюдательные аргументы, подтверждающие существование однородной среды, которая оказывает определяющее влияние на строение и эволюцию Вселенной. Можно сказать, что утверждение о существовании темной энергии стало итогом развития всей наблюдательной космологии XX века.

### ВАКУУМ И ДРУГИЕ МОДЕЛИ

Если в существовании темной энергии большинство космологов уже не сомневаются, то вот относительно ее природы ясности пока нет. Впрочем, физики не первый раз попадают в такое положение. Многие новые теории начинаются с феноменологии, то есть формального математического описания того или иного эффекта, а интуитивно понятные объяснения появляются намного позже. На сегодня, описывая физические свойства темной энергии, космологи произносят слова, которые для непосвященного больше похожи на заклинание: это среда, давление которой равно плотности энергии



Скопление галактик Cl 0024+17 действует как гравитационная линза. Слева: скопление окружено темным кольцом, в котором ослаблен свет далеких галактик. Справа: ближе к ядру скопления видно, как изображения далеких галактик растягиваются в дуги. По таким эффектам можно оценить массу скопления вместе с входящей в него темной материей

по величине, но противоположно по знаку. Если это странное соотношение подставить в уравнение Эйнштейна из общей теории относительности, то окажется, что такая среда гравитационно отталкивается от самой себя и, как следствие, ускоренно расширяется и ни за что не соберется ни в какие сгустки.

Нельзя сказать, что мы часто имеем дело с подобной материей. Однако именно так уже на протяжении многих лет физики описывают

вакуум. По современным представлениям, элементарные частицы существуют не в пустом пространстве, а в особой среде — физическом вакууме, который как раз и определяет их свойства. Эта среда может находиться в различных состояниях, отличающихся плотностью запасенной энергии, и в разных видах вакуума элементарные частицы ведут себя по-разному.

Наш обычный вакуум обладает наименьшей энергией.

Экспериментально обнаружено существование неустойчивого, более энергичного вакуума, который соответствует так называемому электрослабому взаимодействию. Он начинает проявляться при энергиях частиц свыше 100 гигаэлектронвольт — это всего на порядок ниже предела возможностей современных ускорителей. Еще более энергичные виды вакуума предсказаны теоретически. Можно предположить, что наш обычный вакуум обладает не ►

## ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ГРАВИТАЦИОННОЕ ОТТАЛКИВАНИЕ

Описывая темную энергию, космологи считают, что ее главное свойство — отрицательное давление. Оно приводит к появлению отталкивающих гравитационных сил, о которых неспециалисты иногда говорят как об антигравитации. В этом утверждении содержатся сразу два парадокса. Разберем их последовательно.

Как давление может быть отрицательным? Давление обычного вещества, как известно, связано с движением молекул. Ударясь о стенку сосуда, молекулы газа передают ей свой импульс, отталкивают ее, давят на нее. Свободные частицы не могут создать отрицательное давление, не могут «тянуть одеяло на себя», но в твердом теле подобное вполне возможно. Неплохой аналогией отрицательного давления темной энергии служит оболочка воздушного

шарика. Каждый ее квадратный сантиметр растянут и стремится сжаться. Появись где-нибудь в оболочке разрыв, она немедленно стянулась бы в маленькую резиновую тряпочку. Но пока разрыва нет, отрицательное натяжение равномерно распределено по всей поверхности. Причем если шарик надуть, резина будет становиться тоньше, а запасенная в ее натяжении энергия будет расти. Сходным образом ведет себя при расширении Вселенной плотность вещества и темной энергии.

Почему отрицательное давление ускоряет расширение? Казалось бы, под действием отрицательного давления темной энергии Вселенная должна сжиматься или уж, по крайней мере, замедлять свое расширение, начавшееся в момент Большого взрыва. Но

все обстоит как раз наоборот, потому что отрицательное давление темной энергии слишком велико.

Дело в том, что согласно общей теории относительности гравитация зависит не только от массы (точнее плотности энергии), но также и от давления. Чем больше давление, тем сильнее гравитация. А чем больше отрицательное давление, тем она слабее! Правда, давления, достижимые в лабораториях и даже в центре Земли и Солнца, слишком малы, чтобы их влияние на гравитацию можно было заметить. Но вот отрицательное давление темной энергии, наоборот, столь велико, что пересиливает притяжение и ее собственной массы, и массы всего остального вещества. Получается, что массивная субстанция с очень сильным отрицательным давлением

парадоксальным образом не сжимается, а наоборот, расширяется под действием собственной гравитации.

Представьте себе тоталитарное государство, которое, стремясь обеспечить свою безопасность, зажимает свободу до такой степени, что граждане массово бегут из страны, бунтуют и в конце концов разрушают само государство. Почему чрезмерные усилия по укреплению государства оборачиваются его разрушением? Таковы свойства людей — они сопротивляются подавлению. Почему сильнее отрицательное давление вместо сжатия приводит к расширению? Таковы свойства гравитации, выраженные уравнением Эйнштейна. Конечно, аналогия — это не объяснение, но она помогает «уложить в голову» парадоксы темной энергии.



## Мы живем в эпоху самого быстрого роста структур во Вселенной. Всего через 10 миллиардов лет он должен остановиться

нулевой плотностью энергии, а как раз такой, которая дает нужное значение лямбда-члена в уравнении Эйнштейна.

Однако эта красивая идея, состоящая в том, чтобы приписать темную энергию вакууму, не вызывает восторга у исследователей, работающих на стыке физики элементарных частиц и космологии. Дело в том, что такой разновидности вакуума должна соответствовать энергия частиц всего около тысячной доли электронвольта. Но этот энергетический диапазон, лежащий на границе между инфракрасным и радиоизлучением, уже давно вдоль и поперек изучен физиками, и ничего аномального там не обнаружено.

Поэтому исследователи склоняются к тому, что темная энергия — это проявление нового и пока не обнаруженного в лабораторных условиях сверхслабого поля. Эта идея аналогична той, что лежит в основе современной инфляционной космологии. Там тоже сверхбыстрое расширение молодой Вселенной происходит под действием так называемого скалярного поля, только его плотность энергии гораздо выше той, что ответственна за нынешнее неспешное ускорение в расширении Вселенной. Можно предположить, что поле, являющееся носителем темной энергии,

осталось как реликт Большого взрыва и долгое время находилось в состоянии «спячки», пока длилось доминирование сначала излучения, а потом темной материи.

### КАК ВЗВЕСИТЬ СТРУКТУРУ?

Темная энергия — важнейшее свидетельство существования явлений, которые не описываются современной физикой. Поэтому детальное изучение ее свойств — важнейшая задача наблюдательной космологии. Чтобы выяснить физическую природу темной энергии, необходимо в первую очередь максимально точно исследовать, как менялся в прошлом режим расширения Вселенной. Можно пытаться прямо измерить зависимость темпа расширения от расстояния. Однако из-за отсутствия в астрономии надежных методов определения внегалактических расстояний достичь на этом пути необходимой точности практически невозможно. Но есть другие, более перспективные способы измерения темной энергии, которые являются логическим развитием структурного аргумента в пользу ее существования.

Как уже отмечалось, темп образования структур очень сильно зависит от плотности темной энергии. Сама она не может сгущаться и

создавать структуры и препятствует гравитационному сгущиванию темной и обычной материи. Кстати, поэтому в нашу эпоху те комки вещества, которые еще не начали сжиматься, постепенно «растворяются» в море темной энергии, переставая «чувствовать» взаимное притяжение. Человечество, таким образом, является свидетелем максимального в истории Вселенной темпа образования структур. В дальнейшем он будет только уменьшаться.

Чтобы определить, как менялась со временем плотность темной энергии, нужно научиться «взвешивать» структуру Вселенной — галактики и их скопления — на разных красных смещениях. Есть много способов это сделать, ведь объекты измерения — галактики — хорошо изучены и видны даже на больших расстояниях. Наиболее прямолинейный подход состоит в тщательном подсчете галактик и их структур по упоминавшейся трехмерной карте пространственного распределения галактик. В другом методе масса структуры оценивается по создаваемому ею неоднородному гравитационному полю. Проходя через структуру, свет отклоняется ее гравитацией, и в результате видимые нами изображения далеких галактик деформируются. Этот эффект называется гравитационным линзированием. Измеряя возникающие искажения, можно определить (взвесить) структуру на пути следования света. Этим методом уже сделаны первые успешные наблюдения, а на будущее запланированы космические эксперименты — ведь надо достичь максимальной точности измерения.

Итак, мы живем в мире, динамика расширения которого управляется неизвестной нам формой материи. А единственно достоверное знание о ней, помимо факта ее существования, — это уравнение состояния вакуумоподобного типа, та самая своеобразная связь между плотностью энергии и давлением. Пока нам неизвестно, меняется ли характер этой связи со временем, и если да, то как. А значит, все рассуждения о будущем Вселенной, по сути, являются спекулятивными, основанными в значительной мере на эстетических воззрениях их авторов. Но мы вступили в эру точной космологии, основанной на высокотехнологичных инструментах для наблюдения и развитых статистических методах обработки данных. Если астрономия будет и дальше развиваться такими же темпами, как сегодня, загадка темной энергии будет разгадана уже нынешним поколением исследователей ●