

КОСМОЛОГИЯ


Ребус ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

Почему расширение нашей Вселенной происходит ускоренно? После двух десятилетий исследований ответ на этот вопрос все еще не получен

Марио Ливио и Адам Рисс

В

селенная каждую секунду становится больше и больше. Галактики разлетаются друг от друга, одни скопления удаляются от других скоплений галактик, и повсюду ширится пустое пространство. Это было известно еще с 20-х гг. прошлого века, когда наблюдения Эдвина Хаббла и других астрономов показали, что наша Вселенная расширяется. Недавно выяснилось, что этот процесс происходит с ускорением: галактики разлетаются друг от друга все быстрее и быстрее.

The image features a collection of black cubes scattered across a blue, grid-patterned surface. Each cube is illuminated from within, showing a dense field of stars in various colors (white, blue, yellow, orange). The cubes are arranged in a somewhat haphazard manner, with some clustered together and others isolated. The background is a light blue grid that recedes into the distance, creating a sense of depth. The overall aesthetic is futuristic and scientific.

Подобно тому как
нелегко в первый
раз собрать кубик
Рубика, столь же
сложно отыскать
единое описание
темной энергии —
тайны ускоренного
расширения нашей
Вселенной

ОБ АВТОРАХ

Марио Ливио (Mario Livio) — астрофизик, в течение 24 лет работает с данными космического телескопа «Хаббл». Автор научно-популярных книг, в том числе «Блестящие промахи от Дарвина до Эйнштейна: колоссальные ошибки, допущенные великими учеными, которые изменили наше понимание жизни и Вселенной» (*Brilliant Blunders: From Darwin to Einstein: Colossal Mistakes by Great Scientists That Changed Our Understanding of Life and the Universe*, 2013).



Адам Рисс (Adam G. Riess) — астрофизик Университета Джонса Хопкинса и Научного института космического телескопа. Область его исследований — далекие сверхновые, с помощью которых удалось установить, что наша Вселенная расширяется ускоренно (открытие, удостоенное Нобелевской премии по физике за 2011 г.).



Осознание поразительного факта ускоренного расширения нашей Вселенной возникло в 1998 г., в результате обработки наблюдений далеких сверхновых сотрудниками Австралийского национального университета во главе с Брайаном Шмидтом (Brian Schmidt), в число которых входил и автор настоящей статьи Адам Рисс. Это открытие было независимо осуществлено другой научной группой, возглавляемой Солом Перлмуттером (Saul Perlmutter) из Калифорнийского университета в Беркли. Ученые группы Перлмуттера использовали аналогичный метод и опубликовали результаты исследований в том же году. Вывод обеих научных групп был неизбежен: что-то вызывает расширение Вселенной с нарастающей скоростью. Но что именно? Термином «темная энергия» называют то, что порождает силы отталкивания, которые «расталкивают» Вселенную, заставляют ее расширяться.

После почти двадцатилетнего периода изучения темной энергии ее физическая природа осталась почти столь же неуловимой, как и в начале исследовательского пути. Более того, недавние наблюдения еще сильнее усложнили картину, обозначив несоответствия с общепринятыми научными гипотезами.

Над учеными довлеют несколько неразгаданных тайн. Что такое темная энергия? Почему уровень этой энергии оказывается гораздо ниже, чем это предсказывается большинством теорий, но в то же время он настолько сильный, что может быть

наблюдаем? Как отразится на будущем нашей Вселенной природа темной энергии? И, наконец, означают ли странные свойства темной энергии то, что наша Вселенная приобрела свои особенности случайным образом, что на самом деле она — всего лишь одна представительница многочисленного населения мультивмира (мультивселенной), который содержит бесконечный набор вариантов характеристик, каждый со своими параметрами и со своей темной энергией?

Попытки идентифицировать темную энергию ведутся широким фронтом. Для нескольких новых проектов обсерваторий поставлены четкие цели, и в ближайшее время ожидается существенный прогресс в понимании загадки темной энергии. Есть надежда уже в течение следующего десятилетия или понять природу космологического ускорения, или оставить на неопределенный срок некоторые загадки так и не разгаданными.

Что такое темная энергия?

Существует много научных гипотез о том, чем может быть вызвано космологическое ускорение. Лидирующие теории основываются на свойствах пустого пространства-времени. В квантовой физике вакуум — это не «ничто», а совокупность виртуальных частиц и античастиц, которые спонтанно появляются и аннигилируют друг с другом в течение ничтожных долей секунды. Как бы странно это ни звучало, море эфемерных частиц обладает энергией, а энергия, так же как и масса, порождает

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Почти 20 лет назад ученые обнаружили, что расширение нашей Вселенной ускоренное, и назвали источником этого ускорения темную энергию.
- Интенсивные исследования не прояснили природу темной энергии, но помогли сформулировать ряд дополнительных вопросов. Почему темная энергия настолько слабее, чем предсказания теорий? Что это означает для будущего развития нашей Вселенной? Может ли парадигма темной энергии привести к заключению, что мы живем в мультивмире?
- С появлением новых экспериментов ученые надеются, что в ближайшие годы можно будет получить ответы на некоторые вопросы.

ГИПОТЕЗЫ

Возможности объяснения темной энергии и варианты будущего

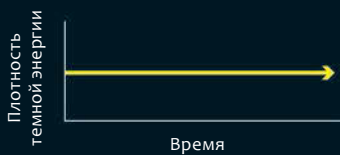
Ученые называют темной энергией то, что вызывает ускоренное расширение нашей Вселенной. Объяснения феномена темной энергии можно условно разделить на три категории. Во-первых, это может быть неизменяемая энергия пустого пространства (гипотеза космологической постоянной). Во-вторых, переменная энергия, ассоциированная с каким-то неизвестным полем, пронизывающим Вселенную (квинтэссенция). Или, наконец, темной энергии может и не быть вовсе — в этом случае гравитация на сверхбольших космологических расстояниях должна подчиняться другим законам.

Модель

Будущее

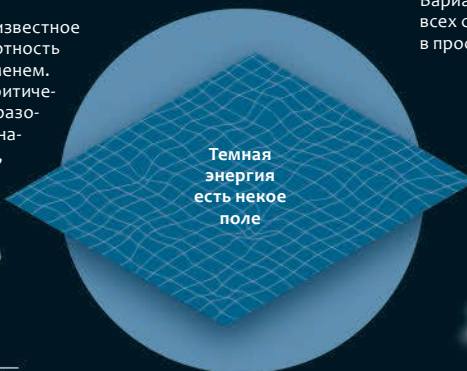
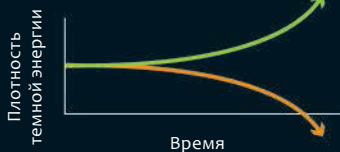
Космологическая постоянная

Если вакуум пустого пространства обладает некоей характеристической энергией, то эта энергия может заставить Вселенную расширяться. Плотность такой энергии будет постоянной во времени и будет действовать как добавленный (а потом убранный) Эйнштейном в уравнения гравитационного поля лямбда-член.



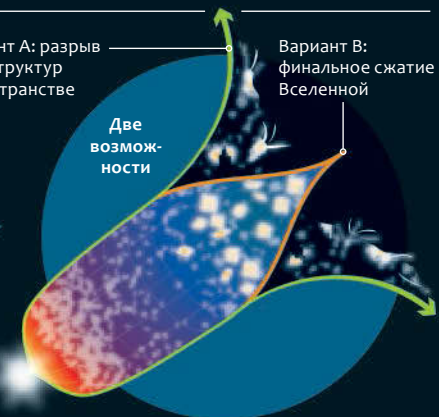
Квинтэссенция

Если темная энергия есть какое-то неизвестное поле, заполняющее Вселенную, то плотность этого поля могла бы меняться со временем. Поле может либо увеличиваться до критических значений, становясь способным разорвать все структуры в космосе, либо, наоборот, уменьшаться, приводя к тому, что Вселенная начнет сжиматься и закончит свое существование в фазе, аналогичной Большому взрыву.



Вариант А: разрыв всех структур в пространстве

Вариант В: финальное сжатие Вселенной

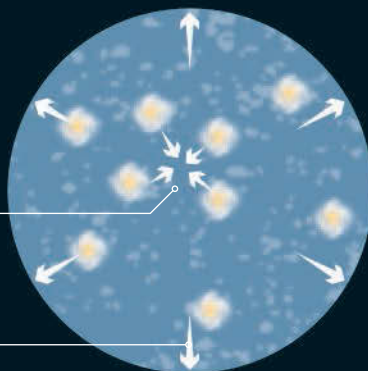


Темной энергии нет

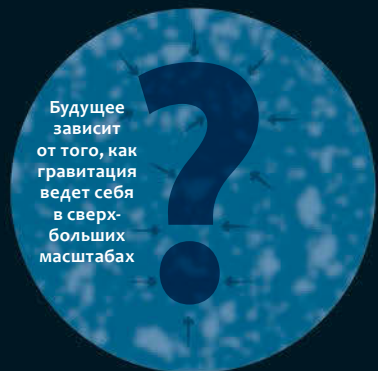
Темной энергии может не быть вовсе. Ускоренное расширение Вселенной может служить указанием на то, что на сверхбольших космологических расстояниях законы гравитации изменяются.

В масштабах галактик и скоплений галактик гравитация ведет себя согласно общей теории относительности

В масштабах порядка размера видимой Вселенной гравитация может сильно отличаться от теории Эйнштейна, и Вселенная начинает укоряться



Будущее зависит от того, как гравитация ведет себя в сверхбольших масштабах



гравитационное поле. Однако в противоположность свойствам массы энергия может быть как отталкивающей, так и притягивающей — в зависимости от того, положительно или отрицательно ее давление. Согласно теории, энергия вакуума в пустом пространстве должна обладать отрицательным давлением, становясь таким образом источником сил отталкивания и управляя ускоренным расширением нашей Вселенной.

Эта идея во многом схожа с концепцией космологической постоянной — члена, добавленного Альбертом Эйнштейном в его уравнения общей теории относительности. Физическая характеристика космологической постоянной — постоянство по всему пространству плотности энергии. Как следует из названия этого члена, гипотеза утверждает, что плотность темной энергии постоянна и в пространстве, и во времени. До сих пор все астрофизические наблюдения наилучшим образом согласуются именно с гипотезой космологической постоянной, но с некоторыми расхождениями.

В качестве альтернативы в роли темной энергии может выступать энергетическое поле, получившее название «квинтэссенция», которое заполняет всю Вселенную и придает каждой точке пространства свойство противодействия силам тяжести. Понятие «поле» общепринято в физике. Посредством полей осуществляются электромагнитные и гравитационные взаимодействия (хотя они, как правило, обладают локальными источниками и не пронизывают все пространство).

Если темная энергия — поле, то оно может и не быть постоянным и может изменяться в зависимости от времени. В этом случае темная энергия однажды могла бы быть сильнее или слабее, чем в современной Вселенной, и поэтому в разное время могла по-разному влиять на Вселенную. Кроме того, влияние темной энергии на эволюцию Вселенной может измениться и в будущем. Например, в так называемой модели замороженного поля темная энергия меняется все медленнее и медленнее. В другой модели — оттаивания замороженного поля — поле вначале меняется медленно, а потом быстрее.

Может существовать и третья причина космологического ускорения: темной энергии нет вообще, а ускоренное расширение Вселенной объясняется физикой, лежащей вне рамок теории гравитации Эйнштейна (общей теории относительности). В таком подходе считается, что теория Эйнштейна неполна. Возможно, что для очень больших масштабов, например порядка размера скопления галактик или даже всей наблюдаемой Вселенной, законы гравитации работают иначе, чем предсказывает теория относительности, и гравитационные силы ведут себя как-то иначе. Было выдвинуто несколько интересных теоретических

предположений, обосновывающих такую гипотезу. Однако альтернативной единой самосогласованной теории, способной объяснить все наблюдения, не существует. Таким образом, темная энергия на сегодняшний момент представляется наилучшим объяснением ускоренного расширения Вселенной. Модели, объясняющие ускорение неравномерным распределением вещества во Вселенной или сетью топологических дефектов пространства-времени, в значительной степени несовместимы с наблюдательными данными.

Почему темная энергия так слаба?

Ни одно из предлагаемых объяснений феномена темной энергии до конца не удовлетворительно. Так, в модели с космологической постоянной предсказывается, что темная энергия должна обладать значительно большей энергией, чем это соответствовало бы наблюдениям. Когда делается попытка простого суммирования по всем энергиям всех возможных квантовых состояний, ассоциированных с описанным выше морем виртуальных частиц и античастиц в вакууме, то получается величина на 120 порядков больше, чем то, что наблюдается. Использование идей теории суперсимметрии, когда к каждой известной частице прилагается более тяжелый партнер (еще не обнаруженный), уменьшает несоответствие, но все равно различие между теоретически предсказываемой и наблюдаемой энергиями остается очень большим. Таким образом, если все-таки темная энергия объясняется энергией вакуума, возникает вопрос: почему же энергия вакуума настолько мала?

Объяснение темной энергии с помощью нового поля едва ли окажется лучше. Теоретики для простоты предполагают (без удовлетворительного обоснования, почему это должно быть именно так), что минимум потенциальной энергии, ассоциированной с темной энергией, очень низкий, а это должно гарантировать, что только небольшое количество темной энергии распространится по пространству. Такие модели требуют, чтобы поле обладало минимальным взаимодействием со всем остальным во Вселенной (кроме своего действия как расталкивающей силы), что объяснить довольно сложно. Данное обстоятельство создает трудности для естественного объяснения темной энергии в рамках общих моделей физики частиц.

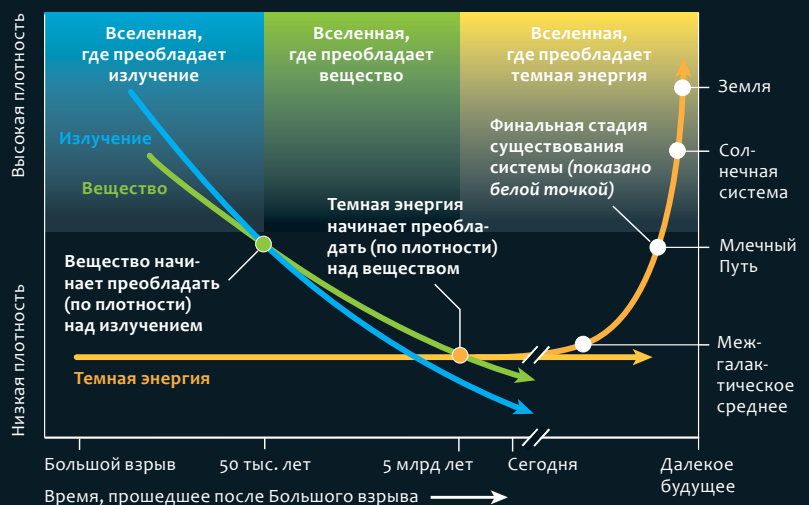
Что это все означает для будущего Вселенной?

Свойства темной энергии определяют окончательный размер Вселенной. Так, если темная энергия — это действительно энергия пустого пространства (т.е. космологическая постоянная), то ускоренное расширение будет продолжаться

ВОПРОСЫ К ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

Космологический контроль

Поскольку темная энергия обладает плотностью, превышающей плотности всех остальных составляющих Вселенной, то она оказывает основное влияние на эволюцию Вселенной и, таким образом, контролирует ее размер. Темная энергия не всегда обладала подобной властью над пространством: наполняющие его другие ингредиенты — излучение (свет) и вещество (включая атомы и обычное вещество, а также невидимую темную материю) — доминировали, когда Вселенная была молодой и маленькой. Вещество и излучение были плотно упакованы в пространстве. С течением времени Вселенная расширяется, вещество и излучение рассредоточиваются, и темная энергия их одолевает. А однажды она может стать настолько сильно, что разорвет все структуры в пространстве.



вечно. Спустя примерно тысячу миллиардов лет от настоящего момента все окружающие нас галактики (за исключением, конечно, тех, которые входят в локальную группу, т.е. ближайших к Млечному пути и гравитационно связанных) начнут разлетаться со скоростью света. Это обстоятельство сделает все такие галактики принципиально недоступными для наблюдений. Галактики — спутники Млечного пути сольются в единую гигантскую эллиптическую галактику. Даже самое древнее излучение (послесвечение Большого взрыва, называемое микроволновым фоновым реликтовым излучением), которое заполняет почти равномерно все пространство, станет ненаблюдаемым, потому что его длины волн растянутся настолько, что станут больше размера видимой к тому моменту Вселенной. Вся бесценная информация, которую дает нам реликтовое излучение, для ученых далекого будущего окажется утерянной безвозвратно — в этом смысле мы живем в счастливые для науки времена.

Если же, с другой стороны, темная энергия — не энергия вакуума, а представляет собой энергию какого-то неизвестного поля, то будущее нашей Вселенной оказывается очень неопределенным. В зависимости от того, как эволюционирует это неизвестное поле, Вселенная может однажды прекратить расширяться и начать сжиматься, стремясь к состоянию «Большого сжатия», которое аналогично началу Большого взрыва. Еще один вариант эволюции Вселенной характеризуется термином «Большой разрыв», что означает разрушение всех сложных структур: все от скопления галактик до атомов и атомных ядер будет разрушено темной энергией. С темной энергией, которая есть неизвестное поле, также возможен сценарий непрерывного ускорения вплоть до тепловой смерти Вселенной.

В альтернативной теории гравитации — если в ней возникнет необходимость — аналогичным образом будут воссоздаваться различные сценарии при различных модификациях классической теории гравитации.

Быть может, мы живем в мультивмире?

В модели с космологической постоянной, держащей первенство достоверности среди ведущих теорий, проблема слабости темной энергии выходит на первый план. Осознавая эту проблему даже до открытия ускоренного расширения Вселенной, физик Стивен Вайнберг (Steven Weinberg) из Техасского университета в Остине предложил новую парадигму. Космологическая постоянная не должна определяться из основных законов физики единственным образом. Это случайная величина, которая принимает различные значения в разных вселенных — гигантском наборе никак не взаимодействующих между собой миров в едином мультивмире. Некоторые такие вселенные могут обладать гораздо большими космологическими постоянными, но тогда силы отталкивания в них настолько велики, что вещество не успевает связываться в галактики, планеты и, соответственно, формировать живые организмы. Поскольку мы существуем, полагал Вайнберг, то мы с необходимостью должны находиться в одной из таких вселенных, где допустимо наше существование. Именно поэтому космологическая постоянная в нашей Вселенной мала — в противном случае некому было бы вообще задаваться подобными вопросами. Эта идея, в дальнейшем развиваемая Александром Виленкиным из Университета Тафтса, Мартином Рисом (Martin Rees) из Кембриджского университета, одним из авторов этой статьи (Марио Ливио), а также многими другими учеными, получила название «антропный принцип».

Есть веские причины, помимо объяснения феномена темной энергии, почему мультимир действительно может возникнуть. Согласно общепринятой теории космологической инфляции, Вселенная очень сильно выросла в объеме в первые доли секунды после своего рождения. Александр Виленкин и Андрей Линде из Стэнфордского университета разработали модель, согласно которой космологическая инфляция, раз начавшись, не останавливается: практически невозможно остановить все новые и новые случаи инфляции, каждая из которых порождает один из раздувающихся пузырьков-вселенных. Таких «карманных вселенных» может быть бесконечно много. В отрыве друг от друга они могут обладать очень разными свойствами.

Существование мультимира может быть следствием теории струн, кандидата на место единой теории всех физических взаимодействий в природе. Вычисления, основанные на версии струнной теории, называемой *M*-теорией, авторы которой — Рафаэль Буссо (Raphael Bousso) и Джозеф

Согласно общепринятой теории космологической инфляции, Вселенная очень сильно выросла в объеме в первые доли секунды после своего рождения

Полчински (Joseph Polchinski), приводят к более чем 10^{500} различных вариантов пространства-времени. Каждый такой мир характеризуется разными фундаментальными константами и даже разными размерностями. Однако для многих ученых одно только упоминание концепции мультимира просто невыносимо. Подобная идея, трудная для восприятия, означает конец классического научного мира, по крайней мере в том виде, как мы его знаем. Дело в том, что исторически научный метод познания требует непосредственной наблюдательной или экспериментальной проверки новых выдвигаемых научных гипотез. Тем не менее концепция мультимира может дать несколько наблюдаемых предсказаний, пригодных для тестирования. Например, некоторые модели мультимира предсказывают, что геометрия пространства-времени слегка искривлена, что можно обнаружить наблюдательными методами. Другая возможность, хотя и маловероятная, заключается в том, что космический микроволновый фон может содержать следы столкновения с другой вселенной.

Находя ответы

Лучший способ раскрыть тайну темной энергии — измерить отношение ее давления (т.е. того, как много темной энергии в долях энергии всей Вселенной) к ее плотности (т.е. того, как много темной энергии в заданном объеме пространства). Это отношение называется параметром или уравнением состояния, w . Если темная энергия есть энергия вакуума (т.е. космологическая постоянная), то параметр состояния — постоянная величина, равная -1 . Если темная энергия ассоциирована с каким-нибудь полем, которое меняется со временем, то есть надежда обнаружить параметр w отличным от -1 и меняющимся в ходе космологической истории. С другой стороны, если обоснование наблюдаемого ускоренного расширения требует изменения теории гравитации Эйнштейна на сверхбольших масштабах, то можно было бы выявить несоответствие между величинами параметра w на разных пространственных масштабах.

Астрономы разработали хитроумные методы косвенных измерений плотности и давления темной энергии. Будучи силой отталкивания, темная энергия или модифицированная гравитация будут противодействовать силам гравитационного притяжения (которые действуют на все тела во Вселенной, обладающие массой, стремясь сблизить их). Противодействие заключается в препятствии формированию крупномасштабной структуры, в том числе скоплений галактик. Таким образом, изучая рост скоплений галактик с течением времени, можно выяснить, насколько сильно было влияние темной энергии в разные эпохи эволюции Вселенной. Рост скоплений можно изучать, наблюдая, как крупные сосредоточения масс отклоняют световые лучи, идущие от далеких фоновых объектов, расположенных за ними, — такой эффект называется гравитационным линзированием. Степень искривленности траекторий лучей позволяет оценивать массы скоплений галактик. Проводя наблюдения на разных расстояниях, можно измерить, насколько часто встречаются массивные скопления в различные эпохи (напомним, что в космологии взгляд вдаль означает взгляд назад во времени; чем дальше наблюдаемый объект, тем в более далеком прошлом он находится, поскольку свет от этого объекта движется с конечной скоростью).

Темную энергию можно измерять, изучая, как скорость расширения Вселенной меняется со временем. Наблюдая объекты на разных расстояниях и измеряя их красные смещения (т.е., как сильно длины волн их излучения были растянуты в результате расширения пространства), можно узнать, как долго Вселенная уже расширяется с момента излучения этих волн. Этот метод, по сути, и был тем самым, посредством которого

две научные группы независимо друг от друга обнаружили космологическое ускорение. Были измерены красные смещения нескольких сверхновых типа Ia (расстояния до этих звезд надежно определяются по их яркости). Другой вариант использования этого метода — наблюдение видимого размера флуктуаций плотности распределения галактик по пространству (так называемые барионные акустические колебания). Этот метод также служит очень надежным определением космологических расстояний. Индикаторы расстояний помогают проследить историю расширения Вселенной.

На сегодня измерения w , как правило, хорошо согласуются (конечно, в пределах ошибок наблюдений) со значением -1 в пределах 10% и, таким образом, поддерживают гипотезу объяснения космологического ускорения с помощью космологической постоянной. Недавно научная группа во главе с Риссом использовала космический телескоп «Хаббл» для исследования темной энергии на расстоянии около 10 млрд лет в прошлом, используя технику работы со сверхновыми. В результате никаких изменений во времени параметра w обнаружено не было.

Однако стоит отметить, что в последние несколько лет некоторые намеки на отклонения от предсказаний модели с космологической постоянной все еще присутствуют. Например, сопоставление измерений космического микроволнового реликтового фона (который позволяет получить характеристики полной массы и энергии Вселенной), осуществленных миссией «Планк», с измерениями гравитационно-линзовых эффектов дает значение параметра w , меньшее -1 . Наблюдения Системы телескопов панорамного обзора и быстрого реагирования (*Pan-STARRS*), использующей более 300 сверхновых для отслеживания космологического расширения, также указывают на то, что значения w уходят в отрицательную область дальше -1 . Недавние наблюдения барионных акустических осцилляций в данных по удаленным ярким галактикам, называемых квазарами, указывают на то, что плотность темной энергии возрастает со временем. Наконец, небольшие расхождения между локальными измерениями скорости расширения современного пространства, сравнимые с измерениями первичного темпа расширения по данным анизотропии реликтового излучения, также могут указывать на расхождения с моделью космологической постоянной. Эти результаты очень интригующие, но недостаточно убедительные. Больше данных в ближайшем будущем смогут либо усилить намечающиеся расхождения, либо отнести их в категорию систематических ошибок.

Начата работа по улучшению в 100 раз точности измерения свойств темной энергии. Таких

результатов планируется достичь в ближайшее десятилетие. Новый проект по наблюдению над темной энергией *Dark Energy Survey* начал работу в 2013 г. Большой обзорный телескоп (*LSST*) вступит в строй предположительно в 2021 г. Оба проекта предназначены для сбора более полной информации о крупномасштабной структуре Вселенной и для изучения истории ее расширения. Проект *NASA* Инфракрасный телескоп глубокого обзора (*WFIRST-AFTA*) представляет собой 2,4-метровый телескоп, планируемый к запуску в середине 2020-х гг. В результате его работы ожидаются наблюдения далеких сверхновых и барионных акустических осцилляций, а также событий гравитационного линзирования. Запуск аппарата «Евклид» Европейского космического агентства в настоящее время планируется в 2020 г. и также будет использоваться для исследования эффектов гравитационного линзирования, барионных акустических осцилляций и измерения расстояний до галактик по красному смещению для определения трехмерного распределения скоплений галактик.

И, наконец, можно будет протестировать теории модифицированной гравитации на основе измерений в пределах Солнечной системы. Один из методов — измерение расстояния до Луны с такой поразительно высокой точностью (путем использования отражения лазерного света зеркалами, установленными на поверхности Луны), что это позволит обнаружить малейшие отклонения от теории относительности. Кроме того, открываются возможности проводить уникальные лабораторные эксперименты, позволяющие обнаруживать мельчайшие отклонения от известных законов гравитации. Ближайшие годы — поворотный момент для исследований в области темной энергии, когда мы сможем получить ответы на ключевые вопросы об ускоренном расширении Вселенной. Тогда и определится будущее нашего мира. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Рисс А., Тернер М. От замедления к ускорению // ВМН, № 5, 2004.
- Краусс Л., Тернер М. Космическая загадка // ВМН, № 12, 2004.
- Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. Adam G. Riess et al. in *Astronomical Journal*, Vol. 116, No. 3, pages 1009–1038; September 1998.
- The Accelerating Universe. Mario Livio. Wiley, 2000.