



**КОСМИЧЕС**



ФИЗИКА

# КАЯ ЗАГАДКА

Необычайно малая величина космологической постоянной —  
одна из самых больших нерешенных проблем физики

*Клара Московиц*

## ОБ АВТОРЕ

Клара Московиц — старший редактор журнала *Scientific American*, освещает вопросы космоса и физики.



## Даже в самой пустой пустоте всегда что-то есть.

Если бы удалось увеличить масштаб пустого пространства, одновременно убрав все планеты, звезды и галактики, можно было бы ожидать абсолютного вакуума, но это не так. Вместо этого вы обнаружили бы полную драматических событий сцену, в которой постоянно рождаются и почти сразу умирают частицы.

Квантовая механика, теория, управляющая миром бесконечно малых объектов, не допускает абсолютной пустоты. В любой точке пространства-времени энергия не может быть строго равна нулю — всегда есть место для маневра. Благодаря этому там могут родиться «виртуальные» частицы — в частности, пара из частицы и ее античастицы, которые аннигилируют друг с другом и исчезают столь же быстро, как и появились. Каким бы странным это ни казалось, эффекты виртуальных частиц наблюдались экспериментально в реальном мире. Когда с помощью ускорителя элементарных частиц впервые была измерена масса *Z*-бозона, она немного отличалась от его чистой массы, потому что иногда он превращался в виртуальный истинный кварк — одно из многих наблюдений, доказывающих существование виртуальных частиц.

Эффект от всех этих рождающихся и умирающих частиц — монотонное шипение энергии вакуума, заполняющей космос, которая заставляет расширяться само пространство. Этот активный процесс — наиболее правдоподобное объяснение темной энергии, причины, по которой Вселенная вместо того, чтобы оставаться статичной или даже расширяться с постоянной скоростью, с каждой секундой растет все быстрее и быстрее.

Проблема с энергией вакуума заключается в том, что ее недостаточно. Когда ученые впервые придумали эту концепцию, они подсчитали, что энергия эта должна быть невероятно большой — она должна была расширить Вселенную так сильно и быстро, что ни звезды, ни галактики не смогли бы образоваться. Поскольку ясно, что это не так, энергия вакуума во Вселенной должна быть очень маленькой — примерно на 120 порядков величины меньше, чем предсказывает квантовая теория. Это

как если бы сказать, что нечто весом в 2 кг на самом деле должно весить 2 кг со 120 нулями. Такое несоответствие побудило некоторых ученых называть энергию вакуума «худшим теоретическим предсказанием в истории физики».

Энергию вакуума считают основной компонентой космологической постоянной, математического члена в уравнениях общей теории относительности (ОТО). Огромное несоответствие между теоретически предсказанной величиной энергии вакуума и ее измеренным значением часто называют проблемой космологической постоянной. «Ее обычно рассматривают как одну из самых неудобных, запутанных и сложных проблем в современной теоретической физике, — рассказывает Антонио Падилья (Antonio Padilla), физик из Ноттингемского университета в Англии, потративший 15 лет на то, чтобы ее разгадать. — Это дает основания предполагать, что в нашей картине чего-то не хватает. Я нахожу это захватывающим — так почему бы над этим не поработать?».

Загадка эта привлекла внимание некоторых из величайших умов в физике и породила огромное количество идей для ее решения. В прошлом году Грегори Габададзе (Gregory Gabadadze) из Нью-Йоркского университета, выступая на физическом факультете Браунского университета, в течение часа рассмотрел все концепции, выдвинутые теоретиками на текущий момент. По окончании кто-то из присутствующих задал вопрос, какая из идей ему нравится больше всего. «Ни одна из них», — ответил Габададзе. По его словам, они слишком «радикальны» и требуют «отказа от неприкосновенных принципов».

Однако некоторые физики полагают, что новые теоретические работы вносят свежую струю, вселяющую надежду на выход из тупиковой

ситуации. А недавние успехи в прецизионных лабораторных экспериментах, исследующих гравитацию, а также рождение гравитационно-волновой астрономии вселяют надежду на то, что некоторые из предлагаемых решений проблемы смогут быть наконец подвергнуты экспериментальной проверке — или по крайней мере исключены из рассмотрения.

### Рождение проблемы

История космологической постоянной пестрит событиями. «Ее резонно можно было бы назвать нерешением непроблемы», — рассказывает физик Рафаэль Соркин (Rafael Sorkin) из Института теоретической физики «Периметр» в канадской провинции Онтарио. Альберт Эйнштейн впервые ввел ее в оборот в 1917 г. как математическую заплатку, чтобы заставить свои уравнения общей теории относительности предсказывать статическую Вселенную, каковой он и большинство ученых ее

в книге истории физики, но она тихо готовилась к возвращению. В конце 1990-х гг. две группы астрономов производили независимые измерения темпа расширения Вселенной. В 1998 и 1999 гг. они опубликовали свои результаты, основанные на наблюдениях особых сверхновых, расстояния до которых можно определять с большой точностью. Самая удаленная из этих сверхновых оказалась гораздо тусклее и, следовательно, дальше, чем предполагалось. Расширение вовсе не замедлялось — его скорость возрастала. Это ошеломляющее открытие принесло трем руководителям групп Нобелевскую премию и побудило космолога Майкла Тернера (Michael Turner) придумать термин «темная энергия» для загадочной силы, вызывающей это ускорение. Физики сразу же предположили, что возможный источник темной энергии — космологическая постоянная, иными словами, энергия вакуума. «В промахе Эйнштейна понимания, пожалуй, было больше, чем в лучших работах простых смертных», — позднее писал Сол Перлмуттер (Saul Perlmutter), один из первооткрывателей ускоренного расширения.

Хотя космологическая постоянная позволила ученым снова привести в равновесие уравнения поля Эйнштейна, заставив их предсказывать ускоряющуюся Вселенную, подобную той, которую наблюдали астрономы, величина этой постоянной физического смысла не имела. Это на самом деле усугубило проблему, что некоторое время вызывало беспокойство ученых. В те годы, когда космологическая постоянная оставалась невостребованной в уравнениях общей теории относительности, физики связали этот термин ОТО с квантово-механической концепцией энергии вакуума. Однако предполагалось, что энергия вакуума колоссальна.

Одним из первых, кто заметил, что что-то здесь не так, был физик Вольфганг Паули, который в 1920-х гг. обнаружил, что энергия эта должна быть настолько большой, что Вселенная должна была расширяться до такой степени, что свет не смог бы преодолеть расстояние между любыми двумя ее объектами. По подсчетам Паули, с Земли «не видно было бы даже Луны». Полученная им оценка якобы позабавила его самого, и в то время никто не воспринял ее всерьез. Первым, кто вычислил значение космологической постоянной на основе предсказаний квантовой теории для энергии вакуума, был физик Яков Зельдович. В 1967 г. Зельдович показал, что вакуум эквивалентен материи с определенной плотностью



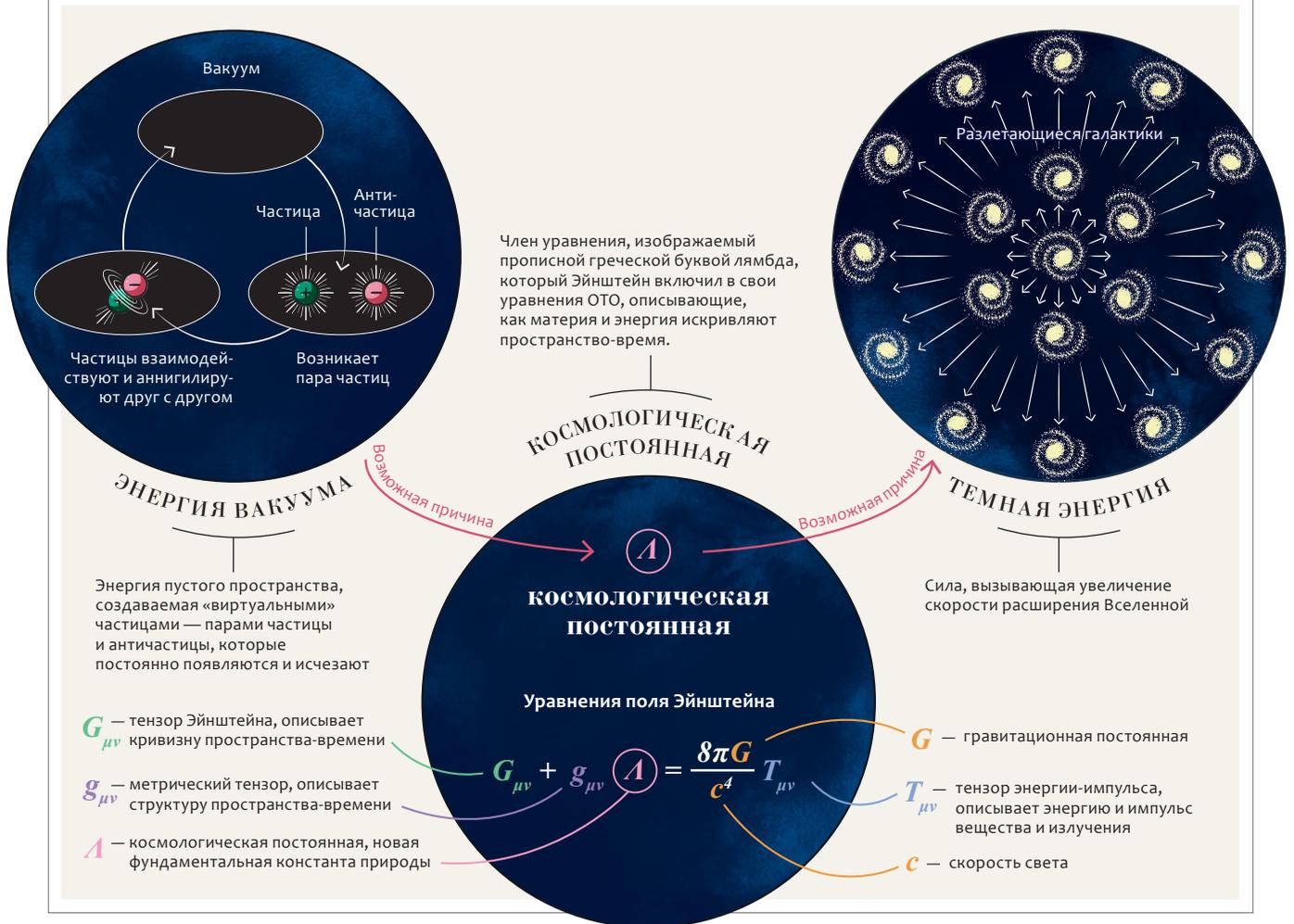
*Когда нейтронные звезды сталкиваются, образовавшиеся в результате гравитационные волны могут помочь физикам, занимающимся изучением космологической постоянной*

в то время считали. Но в 1929 г. астроном Эдвин Хаббл измерил скорости многих галактик и, к своему удивлению, обнаружил, что все они удаляются от нас; оказалось, что чем дальше галактика, тем быстрее она движется. Его измерения показали, что пространство расширяется повсюду, и куда бы вы ни посмотрели, будет казаться, что все галактики удаляются, потому что расстояние между всеми объектами постоянно увеличивается. Узнав об этом открытии, Эйнштейн несколько лет спустя решил удалить космологическую постоянную из своих уравнений, назвав это, по словам физика Георгия Гамова, своей «самой большой ошибкой».

Какое-то время космологическая постоянная оставалась лишь подстрочным примечанием

## Три части головоломки

Проблема космологической постоянной — одна из важнейших загадок физики: величина этой постоянной, представляющей собой часть уравнений ОТО Альберта Эйнштейна, судя по всему, гораздо меньше, чем должна была быть, согласно теоретическим предсказаниям. В основе этой головоломки — три взаимопереплетающихся понятия: энергия вакуума (энергия пустого пространства), темная энергия (причина ускорения Вселенной) и сама эта постоянная.



и сверхсильным отрицательным давлением. Но в то время ученые думали, что Вселенная расширяется с постоянной или замедляющейся скоростью, и большинство полагали, что космологическая постоянная равна нулю. Так родилась проблема космологической постоянной.

30 лет спустя, когда астрономы поняли, что скорость расширения космоса увеличивается, проблема не исчезла. Величина ускорения, хоть и вызвавшая в то время шок, все же была мизерной по сравнению с тем, какой она должна была быть согласно квантовой теории. В некотором смысле возрождение космологической постоянной только усугубило ситуацию. Одно дело — попытаться представить, почему может оказаться, что космологическая постоянная в точности равна нулю. Гораздо труднее понять, почему она может быть

чуть больше, чем ничто. «Ее величина совершенно непонятна, — говорит физик-теоретик Кэтрин Фриз (Katherine Freese) из Техасского университета в Остине. — Даже более непонятна, чем если бы она была равна нулю».

Не все согласны с тем, что проблему эту следует закрыть раз и навсегда. Технически космологическая постоянная представляет собой одну из констант природы, числовой параметр в уравнении, который может принимать любые значения, объясняет Сабина Хоссенфельдер (Sabine Hossenfelder), физик-теоретик из Франкфуртского института перспективных исследований в Германии. Тот факт, что ее числовое значение именно таково, каково оно есть, — дело случая. «Можно было бы просто взять определенную константу и покончить со всем этим, — продолжает

Хоссенфельдер. — Все споры о том, почему она имеет именно такую величину, с научной точки зрения не имеют ни малейшего основания». В квантовой теории поля не было никакой фальсификации, когда ее предсказание не соответствовало результатам астрономических измерений, и теория эта по-прежнему столь же актуальна, как и ранее. «Я полагаю, что большинство членов сообщества космологов и астрофизиков считают это проблемой, потому что им уже давно прожужжали об этом все уши», — отмечает исследовательница.

Тем не менее многие физики не в силах отказаться от этого. Неожиданно малая величина космологической постоянной — нить, за которую следует потянуть. «Меня эта проблема очень беспокоит, — говорит Габададзе, — и я хочу получить ответы на некоторые вопросы».

### Изобилие теорий

Несмотря на многочисленные старания физиков добиться ответа на интригующий вопрос, темпы прогресса оставались удручающе медленными. «Прошло уже более 50 лет с тех пор, как Зельдович указал, в чем проблема, но установленного, общепринятого объяснения по-прежнему нет, — говорит Падилья. — Идеи появляются и исчезают, но обычно очень мало что оказывается в сухом остатке».

Предлагаемые решения проблемы космологической постоянной в основном можно разделить на три категории: переписать уравнения общей теории относительности, описывающие расширение Вселенной; модифицировать уравнения квантовой теории поля, которые предсказывают количество энергии вакуума; или вдобавок к первому и второму вбросить что-нибудь совершенно новое.

Корректировкой общей теории относительности можно изменить математическую роль, которую играет космологическая постоянная, или вовсе ее исключить. Например, Фриз и ее коллеги пытались устранить необходимость в космологической постоянной для объяснения ускорения Вселенной, используя другой способ расчета ее расширения в рамках общей теории относительности. «Материи и фотонов, вероятно, будет достаточно и без внесения во Вселенную каких-либо новых компонентов, если изменить их роль в уравнениях», — объясняет Фриз. Ее модель основана на идее, что, помимо наблюдаемых нами трех пространственных и одного временного, от нас могут прятаться дополнительные измерения.

Подход с другого ракурса к обновлению ОТО, называющийся секвестрацией, предложен Падильей и его коллегами. Они видоизменяют теорию Эйнштейна, изолируя гравитацию таким образом, чтобы она не чувствовала воздействия со стороны энергии вакуума. «Не собираюсь делать вид, что это достоверная модель, — добавляет Падилья, — но никто не смог ее опровергнуть».

Но если проблема не в общей теории относительности, то, возможно, она в квантовой механике? Некоторые теоретики предположили, что метод квантовой теории поля для расчета энергии вакуума не работает. Штефан Холландс (Stefan Hollands) из Лейпцигского университета в Германии и его коллеги видят проблему в применении обычных квантовых уравнений к искривленному пространству-времени, утверждая, что они были написаны для плоского пространства. Они уверены, что если бы физикам удалось правильно модифицировать их для случая искривленного пространства, то проблема космологической постоянной исчезла бы сама по себе.

Но для решения проблемы может потребоваться нечто большее, чем математические фокусы с традиционными уравнениями. Одна из недавних неортодоксальных идей — предположение Стива Карлипа (Steve Carlip) из Калифорнийского университета в Дейвисе о том, что пространство-время, по сути, представляет собой «пену». В предложенной ученым модели кривизна пространства постоянно меняется, но в чрезвычайно малом масштабе, намного меньшем всего того, что мы могли бы надеяться когда-нибудь измерить. Вся эта сложная топология компенсировала бы значительную часть влияния космологической постоянной, сделав ее очень малой на локальном уровне. «Это довольно безумная идея, — отмечает Карлип. — Отчаянная мера, впрочем, как и любая другая попытка иметь дело с космологической постоянной, а сейчас отчаянные времена».

Соркин, который убежден, что космическая пена Карлипа — «движение в правильном направлении», также внес вклад в эту область. Он работает над подходом к объединению квантовой механики и теории гравитации, который называется теорией причинных множеств. Согласно этой модели, пространство-время по своей сути дискретно — то есть оно не гладкая непрерывная твердь, а состоит из мельчайших фрагментов, отдельных единиц пространства и времени, которые представляют собой строительные блоки Вселенной, так же как атомы — строительные блоки материи. В этом случае вычисление космологической постоянной включает деление на количество единиц пространства-времени во Вселенной, что приводит к значению, намного более близкому к тому, что наблюдают астрономы.

Одно из самых известных — и, по мнению некоторых, самых плохих — решений проблемы космологической постоянной называется антропным принципом. Согласно его логике, величина космологической постоянной в нашей Вселенной принимает маловероятное значение, но это объясняется тем, что живем мы в Мультивселенной (или Мультимире). Если наша Вселенная — всего лишь один из пузырьков космического моря, в каждом из которых

собственные физические законы и разные константы, то обязательно должен существовать пузырек и с таким значением космологической постоянной. В большинстве других вселенных галактики, звезды, планеты и жизнь не появятся, и поэтому того факта, что мы находимся в одной из таких аномалий, следовало ожидать. Поскольку теория струн требует существования Мультивселенной, работающие в области теории струн физики склонны считать проблему космологической постоянной, по существу, уже решенной путем такого рода рассуждений. Однако другие физики считают подобную философию уловкой. «Это признание в неспособности решить проблему», — уверен Соркин.

Все эти стратегии, как правило, предполагают весьма существенный пересмотр устоявшейся физики. «Каждая из них призывает к серьезному переосмыслению основных принципов, скажем, либо пространства-времени, либо числа измере-

## В течение нескольких следующих десятилетий эксперименты должны прояснить вопрос, служит ли космологическая постоянная источником темной энергии

ний Вселенной, — говорит Габададзе. — Все они в каком-то смысле неприятны». Ни одна из теорий не поднялась хоть как-то заметно над остальными. «В настоящее время это становится делом вкуса, — полагает Карлип. — Ответ, вероятно, следует искать в том, о чем никто еще не думал».

### Постоянство или квинтэссенция?

Космологическая постоянная остается наилучшим объяснением темной энергии — неведомой силы, вызывающей увеличение скорости расширения Вселенной. Но что если в действительности темная энергия вообще не связана с космологической постоянной или энергией вакуума? Что если энергия вакуума Вселенной каким-то образом полностью компенсируется, а космологическая постоянная равна нулю? В этом случае темная энергия может быть продуктом некоей сущности, называемой квинтэссенцией.

Понятие квинтэссенции было введено в 1998 г. физиками Робертом Колдуэллом (Robert Caldwell), Полом Стейнхардтом (Paul Steinhardt) и Рахулом Дейвом (Rahul Dave) как альтернативное объяснение ускоряющегося расширения Вселенной. Квинтэссенция — это вид темной энергии, который описывается не фундаментальной постоянной (космологической постоянной уравнений

Эйнштейна), а новым физическим полем, обладающим определенным уравнением состояния. Для квинтэссенции в этом уравнении состояния отношение давления к плотности есть величина больше  $-1$  и меньше  $0$ . Если же это отношение меньше  $-1$ , то темная энергия носит название фантомной. Плотность фантомной энергии с расширением Вселенной бесконечно возрастает, что приводит к «Большому разрыву», когда силы антигравитации в далеком будущем оказываются способными разорвать не только гравитационно связанные системы, но даже атомы. Возможны также комбинированные модели, в которых отношение давления к плотности зависит от времени.

Чтобы проверить, вызвана ли темная энергия новым физическим полем или космологической постоянной, ученые должны понять, как уравнение состояния темной энергии меняется со временем. Различные проекты собирали данные о скорости расширения Вселенной в разные космические эпохи. Один из примеров — проект «Карта темной энергии» (*Dark Energy Survey*), продолжающийся шесть лет, цель которого — с помощью Телескопа им. Виктора Бланко в Чили нанести на карту большую часть неба галактики, находящиеся от нас на различных расстояниях. Данные наблюдений получены, но ученые все еще их анализируют — и пока все признаки указывают на то, что темная энергия реализуется в виде космологической постоянной. Другой способ узнать, существует ли поле темной энергии, — поискать доказательства того, что эта энергия вызвала изменение фундаментальных констант природы с течением времени. Никаких указаний на непостоянство констант пока не выявлено.

В течение нескольких следующих десятилетий эксперименты должны прояснить вопрос, служит ли космологическая постоянная (и стоящая за ней энергия вакуума) источником темной энергии. Программа «Исторический обзор пространства и времени» (*Legacy Survey of Space and Time*), которую планируется начать в 2022 г. на строящемся в настоящее время в Чили телескопе Обсерватории им. Веры Рубин, должна значительно улучшить точность текущих измерений истории расширения Вселенной. Возможно, уже скоро ученые смогут гораздо четче сказать, есть ли в их данных место для квинтэссенции или фантомной энергии или же существует новая фундаментальная физическая постоянная —  $1$ -член.

### Рябь пространства-времени и нейтронные звезды

Если, как это статистически соответствует наблюдательным данным, темная энергия все-таки описывается космологической постоянной, то все еще остается некоторая надежда разобраться в различных предлагаемых объяснениях ее неожиданной

малости. Предстоящие эксперименты и астрономические наблюдения, возможно, предложат способ понять, какие теории развивать, какие отсеять, а каким, может быть, оказать поддержку.

Пять лет назад ученые получили в свое распоряжение принципиально новый телескоп для изучения космоса, когда они начали регистрацию гравитационных волн — «ряби» пространства-времени, возникающей в результате гравитационного взаимодействия черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах. Гравитационно-волновые обсерватории, такие как *LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*, Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) в США и *Virgo* в Европе, теперь регулярно регистрируют волны, вызванные космическими катаклизмами, и, возможно, волны эти окажутся полезными для исследования природы энергии вакуума. Ряд попыток решить проблему космологической постоянной основаны на модификациях общей теории относительности, которые могли бы, например, заставить гравитацию распространяться немного медленнее скорости света. Тот факт, что гравитационные волны от одних и тех же событий, судя по всему, прибывают одновременно со светом, опровергает эту гипотезу, и уже несколько теорий были отвергнуты. «Десять лет назад у нас была модель под названием "Великолепная четверка" (*Fab Four*), целью которой было решение проблемы космологической постоянной, — рассказывает Падилья. — Я сам уже начал сомневаться в ее состоятельности, но данные гравитационных волн окончательно ее убили».

По мнению некоторых ученых, гравитационные волны также обнаруживают странную активность внутри нейтронных звезд. Эти компактные остатки сверхновых сжаты настолько плотно, что их атомы схлопываются, а протоны и электроны, сталкиваясь, образуют вещество, почти полностью состоящее из нейтронов. Это причудливое состояние порождает странные явления — например, возможно, что ядро нейтронной звезды содержит новую фазу вещества, которая может вызвать скачок содержащейся в ней энергии вакуума. Может быть, гравитационно-волновые обсерватории окажутся чувствительными к гравитационным эффектам локальных излишков энергии вакуума, что потенциально поможет раскрыть природу энергии вакуума.

В то время как астрофизические эксперименты ищут ключи к разгадке на космических просторах, эксперименты в наземных лабораториях также могут помочь исследователям определиться с гипотезами о космологической постоянной. Так, приборы по исследованию законов природы на малых расстояниях могут оказаться чувствительными к возможным изменениям ОТО, которые предлагаются теоретиками.

Примером может служить работа группы *Eöt-Wash* из Вашингтонского университета, где ученые используют эксперимент с чрезвычайно чувствительными весами для проведения точных измерений силы тяжести. Их инструментом служат торсионные весы — металлический диск с вырезанными в нем отверстиями, который свисает на тонкой проволоке, а прямо под ним находится такой же диск, вращающийся с постоянной скоростью. Они разделены расстоянием, равным примерно толщине листа бумаги, и когда нижний диск вращается, его гравитационная сила заставляет верхний диск вращаться взад-вперед.

Этот чрезвычайно чувствительный эксперимент позволяет ученым отслеживать, как ведет себя гравитация в масштабе до нескольких десятков микрометров. Если гравитационная сила ослабевает на таком близком расстоянии, как предполагают некоторые теории, или если там заметны дополнительные (*помимо обычных трех*. — *Примеч. пер.*) мельчайшие пространственные измерения, группа *Eöt-Wash* их обнаружит. Пока в их экспериментах гравитация в точности следует законам Ньютона и Эйнштейна и никаких скрытых пространственных измерений обнаружено не было, но ученые продолжают совершенствовать свои весы, чтобы исследовать эффект на все меньших и меньших расстояниях между дисками. Даже если группа так никогда и не обнаружит отклонений, связанных с энергией вакуума, это не обязательно станет окончательным вердиктом: возможно, что такие изменения происходят только на расстояниях вне пределов наших возможностей.

«Мы продолжим работу, — говорит Габададзе о попытках экспериментальной проверки гипотезы космологической постоянной. — Каждое поколение физиков, начиная примерно с 1960 г., было свидетелем появления новых решений. Возможно, однажды у некоторых из них появятся предсказания для наблюдений, которые можно будет провести, но в данный момент мы еще не подошли к этому». Несмотря на сложность задачи, он и другие физики все еще надеются решить ее в ближайшее время. Возможно, усилия, предпринимаемые ныне с целью понять проблему космологической постоянной, откроют более глубокие истины квантовой физики и общей теории относительности. Или же ученые найдут какое-нибудь более простое решение проблемы. И даже хотя они ищут решение, которое, может быть, никогда не материализуется, многие физики получают наслаждение от самого процесса этих поисков. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

#### [ИЗ НАШИХ АРХИВОВ](#)

■ Ливини М., Рисс А. Ребус темной энергии // ВМН, № 5–6, 2016.