

# В мире науки

SCIENTIFIC  
AMERICAN

По страницам  
журнала

# Космос

Часть 2

# СОДЕРЖАНИЕ

## Космос / Часть 2

### КОСМОЛОГИЯ

#### Была ли инфляция?

*Анна Ийас, Абрахам Лоеб и Пол Стейнхард*

Данные аппарата «Планк» подтвердили теорию о том, что Вселенная после Большого взрыва имела краткий период сверхбыстрого расширения, называемого инфляцией

#### В чем Эйнштейн ошибся?

*Лоуренс Краусс*

Ошибки великого Эйнштейна помогают проследить историю зарождения трех из важнейших разделов современной космологии

#### Квантовый мультимир

*Ясунори Номура*

Удивительная связь космологии и квантовой механики смогла бы раскрыть тайны пространства и времени

#### Масштабируемая Вселенная

*Калеб Шарф*

Порог между областями известного и неизвестного — это космологический горизонт событий, размер которого устанавливается светом, летящим к нам из ранней Вселенной. Внутри горизонта — наблюдаемая Вселенная, а сразу за ним — таинственный лабиринт

#### Маяк большого Взрыва

*Лоуренс Краусс*

О гравитационных волнах ранней Вселенной

#### Ребус темной энергии

*Марио Ливьо и Адам Русс*

Еще в 20-х годах прошлого века Эдвин Хаббл заметил, что Вселенная расширяется. Но совсем недавно выяснилось, что галактики удаляются друг от друга все быстрее и быстрее

#### 2 Самое пустое место в космосе 58

*Иштван Сапуди*

Попытки объяснить странное холодное пятно в космосе привели ученых к открытию еще более странному: гигантской и почти совершенно пустой области

#### 12 Черные дыры в начале времен 68

*Хуан Гарсиа-Бейидо и Себастьян Клесс*

Черные дыры, рожденные Большим взрывом — кандидаты на роль загадочной темной материи

### КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 20 Первый среди первых 76

*Виктор Фридман*

Ректор МГУ, академик **Виктор Садовничий** об университетской космической программе

### 30 АСТРОФИЗИКА

#### Гигантские пузыри Млечного пути 82

*Дмитрий Малышев, Мэн Су и Дуглас Финкбейнер*

Загадочные пузыри Ферми — свидетели бурных процессов, происходивших в галактике Млечный путь

#### Нераскрытые тайны скрытого космоса 88

*Богдан Добреску и Дон Линкольн*

Необычайные свойства загадочной темной материи

#### Послания черных дыр 98

*Владимир Покровский*

Академик РАН **Александр Сергеев** о проекте LIGO

#### Нейтрино на краю света 102

*Фрэнсис Халзен*

Десятки космических частиц оказались пойманными в эксперименте IceCube на Южном полюсе. Информация, принесенная этими гостями с другого конца Вселенной, поможет решить многие загадки космоса



Всё, всем, всегда

# ДОСТУПНО



Номера журнала за все годы  
читайте в **любом удобном** для вас формате

## ЦИФРОВЫЕ РЕСУРСЫ

Мгновенный доступ к текущему номеру и архиву с января 2012 г. с вашего iPad

[www.sciam.ru](http://www.sciam.ru)



Google play



**В мире  
науки**

SCIENTIFIC  
AMERICAN

Ежемесячный  
научно-информационный  
журнал

КОСМОЛОГИЯ

# БЫЛА *ли инфляция?*

РЕЗУЛЬТАТЫ НЕДАВНИХ НАБЛЮДЕНИЙ АСТРОФИЗИКОВ  
В СОЧЕТАНИИ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ  
СТАВЯТ ПОД СОМНЕНИЕ СТАВШИЕ ПРИВЫЧНЫМИ  
КОНЦЕПЦИИ ИНФЛЯЦИОННОЙ ТЕОРИИ РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ.  
ВОЗМОЖНО, НУЖНЫ НОВЫЕ ИДЕИ

**Анна Ийас, Абрахам Лоеб и Пол Стейнхард**





## ОБ АВТОРАХ

**Анна Ийас** (Anna Ijjas) — постдокторант в Принстонском центре теоретической науки. Сфера ее научных интересов — происхождение, эволюция и будущее Вселенной, а также природа темной материи и темной энергии.



**Абрахам Лоеб** (Abraham Loeb) — председатель Департамента астрономии Гарвардского университета, директор Гарвардского центра по изучению черных дыр, директор Института теории и вычислений при Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре.



**Пол Стейнхард** (Paul J. Steinhardt) — почетный профессор им. Эйнштейна в Принстонском университете и директор Принстонского центра теоретической науки. Его исследования охватывают проблемы физики частиц, астрофизики, космологии и физики конденсированных сред.



**В** 2013 г. 23 марта Европейское космическое агентство провело международную пресс-конференцию, на которой были оглашены новые данные, полученные с помощью аппарата «Планк». В результате работы этой космической миссии была построена лучшая из всех предыдущих карта космического микроволнового фона (реликтового излучения), который образовался больше 13 млрд лет назад, почти сразу после Большого взрыва. Новая карта, по словам ученых, адресованная журналистской аудитории, подтверждает теорию, предложенную космологами еще 35 лет назад, — о том, что Вселенная имела начало как Большой взрыв с последующим кратким периодом сверхбыстрого расширения, называемого инфляцией.

Это расширение сглаживает Вселенную до такой степени, что миллиарды лет спустя она остается почти однородной во всех направлениях и на всем протяжении. Кроме того, она остается плоской, в противоположность искривленной сфере, за исключением областей незначительных колебаний плотности вещества, характеризующих детали распределения звезд, галактик и скоплений галактик вокруг нас.

Основное сообщение конференции: данные «Планка» превосходно вписываются в предсказание простой инфляционной модели, усиливая

впечатление ее основательности. Казалось, команда «Планка» закрыла книгу космологии. Три автора этой статьи в Гарвард-Смитсоновском центре астрофизики решили обсудить последствия такого заявления. Анна была тогда приглашенной студенткой из Германии. Пол — один из основателей инфляционной теории 30 лет назад, но его поздние работы указывали на серьезные противоречия ее теоретического обоснования; в то время он проводил отпуск в Гарварде. Абрахам был главой астрономического департамента и гостеприимным хозяином. Все авторы статьи отметили скрупулезную

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

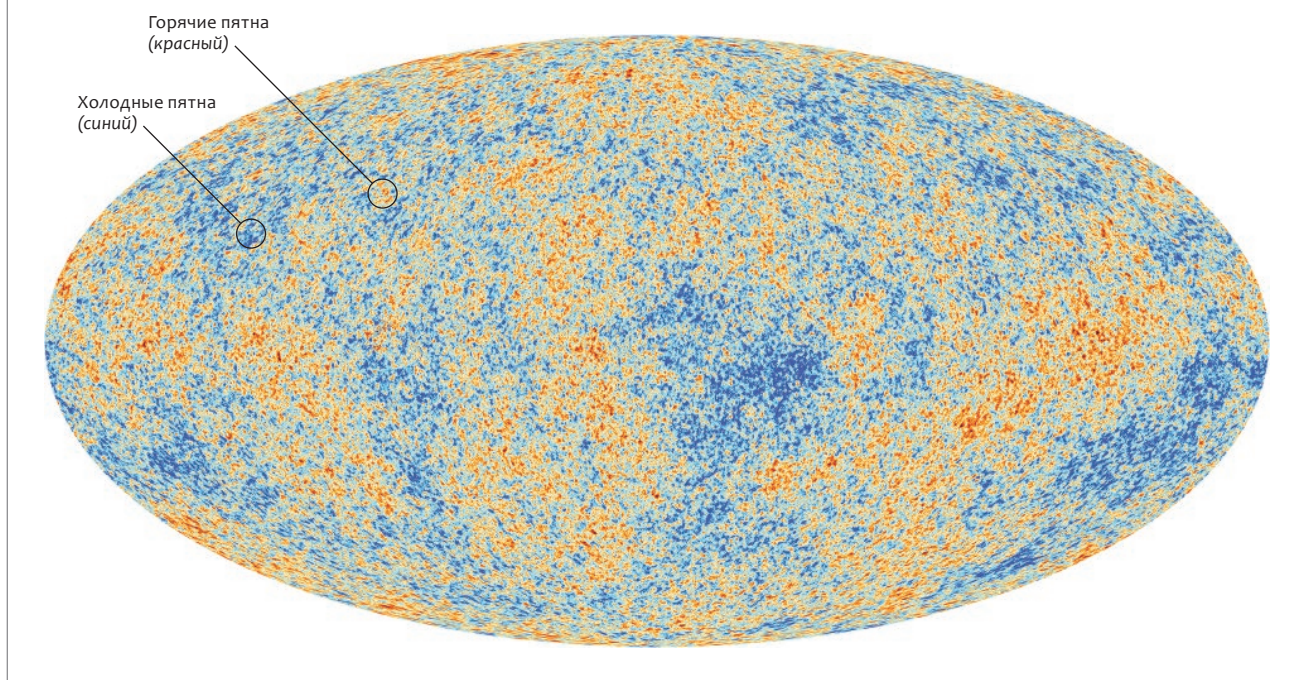
- Последние измерения космического микроволнового фона (реликтового излучения), старейшего света во Вселенной, вызывают озабоченность в отношении инфляционной теории ранней Вселенной, согласно которой в первые моменты своей жизни пространство экспоненциально расширялось.
- Типичное проявление инфляционной стадии — возникновение температурных вариаций (анизотропии) реликтового излучения (хотя картина таких вариаций может быть практически любой). Должны генерироваться также первичные (космологические) гравитационные волны, которые до сих пор не были обнаружены.
- Согласно наблюдательным данным, есть указания на то, что космологи должны пересмотреть парадигму инфляции и рассмотреть новые идеи рождения Вселенной.



## Младенческая фотография Вселенной

На рисунке показана карта, полученная в результате работы космической миссии «Планк», запущенной Европейским космическим агентством. Карта представляет собой космический микроволновый фон, старейший свет во Вселенной, дающий мгновенный отпечаток состояния очень ранней Вселенной. Синие участки неба представляют собой области, где температура реликтового излучения (а значит, и температура ранней Вселенной) понижена, а красные участки неба отражают наличие областей с повышенной температурой. Сторонники инфляционной парадигмы — теории, согласно которой Вселенная стремительно расширялась в первые

моменты своей жизни, — утверждают, что горячие и холодные пятна вполне соответствуют такой модели. Однако инфляция способна произвести фактически любой подобный «узор» и, согласно теории, как правило, дает больший разброс по температурам, чем это наблюдается на представленной карте. Кроме того, если инфляционная стадия имела место, то реликтовое излучение должно было бы содержать признаки космологических гравитационных волн — рябь пространства-времени, вызванную растяжением. Однако этого не наблюдается. Данные «Планка» показывают, что космологические вопросы еще далеки от окончательных ответов.



точность наблюдений команды «Планка». Однако их не устроила интерпретация полученных результатов. Данные «Планка» не согласовывались с самыми простыми инфляционными моделями и обостряли давние фундаментальные проблемы теории, предоставляя новые поводы для рассмотрения конкурирующих идей о происхождении и эволюции Вселенной. В последующие годы данные о реликтовом излучении, собранные разными наземными и космическими инструментами, заканчивая «Планком», только увеличивали проблемы. Но даже сейчас сообщество космологов не оставляет значительным вниманием критику теории инфляции и не в состоянии достаточно непредвзято оценить инфляционную теорию Большого взрыва. Общепринятая точка зрения — вера в теорию инфляции, поскольку она предлагает единственное простое объяснение наблюдаемых особенностей Вселенной. Но, с точки зрения авторов настоящей статьи, данные «Планка» в сочетании с теоретическими результатами потрясают основы незыблемости всей инфляционной парадигмы.

### Следя откровению

С целью продемонстрировать проблемы инфляции авторы, следуя указаниям сторонников этой теории, предлагают начать рассуждения следующим образом: предположим, что инфляция истинна, без всяких вопросов. Теперь представим, что некий всевидящий предсказатель сообщил нам: инфляция действительно произошла вскоре после Большого взрыва. Если мы принимаем слова такого оракула на веру, то что же конкретно нам скажет эта вера об эволюции Вселенной? Если инфляция действительно предлагает простое объяснение эволюции Вселенной, то мы ожидали бы, что оракул скажет нам многое из того, чего нам ждуть от данных «Планка». Например, оракул сказал бы, что через какой-то небольшой промежуток времени после Большого взрыва должны были остаться крохотные следы пространства, заполненного экзотической формой энергии, которая и вызвала ускоренное расширение (инфляцию). Большинство известных форм энергии, например такие, которые содержатся

в веществе и излучении, сопротивляются расширению Вселенной и замедляют его за счет собственных сил гравитационного притяжения. Инфляция требует заполнения Вселенной энергией с высокой плотностью, но такой, которая противостоит бы гравитации, тем самым вызывая ускоренное расширение. Однако заметим, что этот важнейший ингредиент, называемый инфляционной энергией, гипотетический, поскольку нет прямых доказательств его существования. Кроме того, с момента возникновения инфляционной концепции появились буквально сотни предложений о том, для чего может оказаться нужной инфляционная энергия. Каждое предложение отличает свой темп расширения. Таким образом, инфляция не может быть точной теорией, потому что обладает чрезвычайно гибкой структурой, допускающей много возможностей.

Что же может поведать нам оракул такого, что должно быть истинно для всех без исключений инфляционных моделей? Есть одна вещь, относительно которой мы должны быть уверены согласно нашим знаниям квантовой физики: температура и плотность вещества во Вселенной после окончания инфляции обязательно должны незначительно различаться от места к месту. Случайные квантовые флуктуации на субатомных масштабах могли быть растянуты во время инфляционного расширения до областей космологических масштабов, обладающих разным количеством инфляционной энергии. Согласно теории, ускоренное расширение заканчивается, когда инфляционная энергия (*инфляционное поле*. — *Примеч. пер.*) распадается на обычное вещество и излучение. В тех областях, где плотность инфляционной энергии (то есть количество инфляционной энергии на кубический метр пространства) оказалась несколько большей, чем в соседних, ускоренное расширение шло дольше, а температура и плотность Вселенной должны были быть немного выше при окончании этой инфляционной стадии. Следствием квантовых флуктуаций инфляционного поля становятся флуктуации плотности в реликтовом излучении. Таким образом, анизотропия реликтового излучения представляет собой холодные и горячие пятна соответственно пониженной и повышенной яркости — это как бы слепок самых ранних стадий жизни нашей Вселенной. В течение последующих 13,7 млрд лет эти небольшие флуктуации плотности и температуры под воздействием гравитационных сил сформировали крупномасштабную структуру космоса.

Такие рассуждения дают хорошее, хотя и несколько расплывчатое начало. Можем ли мы предсказать количество и вид распределения галактик по пространству? На каком уровне Вселенная становится искривленной и закрученной? Что в большой степени составляет современную

Вселенную — обычное вещество или другие формы энергии? На все эти вопросы теория инфляции не дает ответа, потому что допускает очень широкий диапазон начальных условий развития Вселенной. Дает ли инфляция ответ на вопрос, почему произошел Большой взрыв или как были заданы начальные условия, приведшие мир к тому, что мы наблюдаем сейчас? Нет, она снова не дает ответа.

Если мы априори знаем, что инфляция истинна, то мы не можем сказать большего о горячих и холодных пятнах, которые наблюдались миссией «Планк». Данные, полученные в ходе его работы, и более ранние исследования реликтового излучения показали, что вид горячих и холодных пятен остается принципиально тем же самым при изменении масштаба — свойство, называемое масштабной инвариантностью. Последние данные «Планка» показывают, что отклонение от идеальной масштабной инвариантности очень мало и составляет всего несколько процентов. Среднее значение температурных колебаний вдоль всех пятен есть примерно одна сотая доля процента. Защитники теории инфляции часто утверждают, что возможно изготовить шаблон с такими свойствами. Однако подобные высказывания оставляют за скобками один ключевой момент: инфляция допускает и многие другие шаблоны холодных и горячих пятен, и эти шаблоны практически не бывают масштабно инвариантными и обычно обладают вариацией температур значительно большей, чем наблюдаемая. Другими словами, масштабная инвариантность возможна, но могут присутствовать и большие отклонения от масштабной инвариантности — в зависимости от того, какой именно задается плотность инфляционного поля. Таким образом, данные «Планка» не могут быть приняты как доказательство теории инфляции.

В частности, если априори известно, что инфляция произошла, то в данных «Планка» обязана присутствовать некоторая особенность, поскольку она общая для всех инфляционных моделей. Квантовые флуктуации порождают случайные изменения инфляционного поля, кроме того, эти флуктуации производят случайные искривления пространства, которые распространяются как волны пространственного искажения через всю Вселенную после окончания инфляции. Эти возмущения, известные как гравитационные волны, служат дополнительным источником горячих и холодных пятен в реликтовом излучении. Гравитационные волны дают характерный поляризационный эффект — другими словами, наличие этих волн приводит к тому, что свет приобретает предпочтительную ориентацию своего электромагнитного поля в зависимости от того, исходит ли от горячего или холодного пятна или седлообразных областей между ними. К сожалению, поиск гравитационных волн, рожденных в постинфляционный период, пока не увенчался

успехом. Впервые горячие и холодные пятна — анизотропия реликтового излучения — были обнаружены в результате работы советского эксперимента «Реликт» в 1992 г., а позже в этом же году их наличие было подтверждено американским спутником *COBE* (*Cosmic Background Explorer*, «Исследователь космического фона»). С тех пор анизотропия наблюдалась многократно, включая последние наблюдения «Планка», результаты которых были опубликованы в 2015 г. Однако ни в одном из этих экспериментов вплоть до момента написания данной статьи никаких признаков гравитационных волн обнаружено не было, несмотря на то что они предсказываются теорией инфляции. В 2014 г., 17 марта, по результатам проведения эксперимента *BICEP2* на Южном полюсе было объявлено об обнаружении космологических гравитационных волн, однако более тщательная обработка данных убедила большинство ученых в том, что в действительности наблюдались не гравитационные волны, а поляризация, вызываемая частицами пыли в Млечном пути. Важно подчеркнуть, что ожидаемые космологические гравитационные волны не имеют ничего общего с теми гравитационными волнами, которые генерируются в процессе слияния черных дыр в современной Вселенной, обнаруженными лазерной интерферометрической обсерваторией *LIGO* в 2015 г.

Удивительны результаты эксперимента «Планк»: с одной стороны, реликтовое излучение оказалось неожиданно мало (на несколько процентов) отклоняющимся от идеальной масштабной инвариантности в распределении горячих и холодных пятен, а с другой — гравитационные волны полностью отсутствовали. Впервые более чем за 30 лет простейшие инфляционные модели, включая общепринятые и вошедшие в учебники по космологии, оказались настолько несостоятельными относительно наблюдательных данных. Конечно, теоретики стремительно бросились латать инфляционное полотно, порождая, однако, только новые трудности.

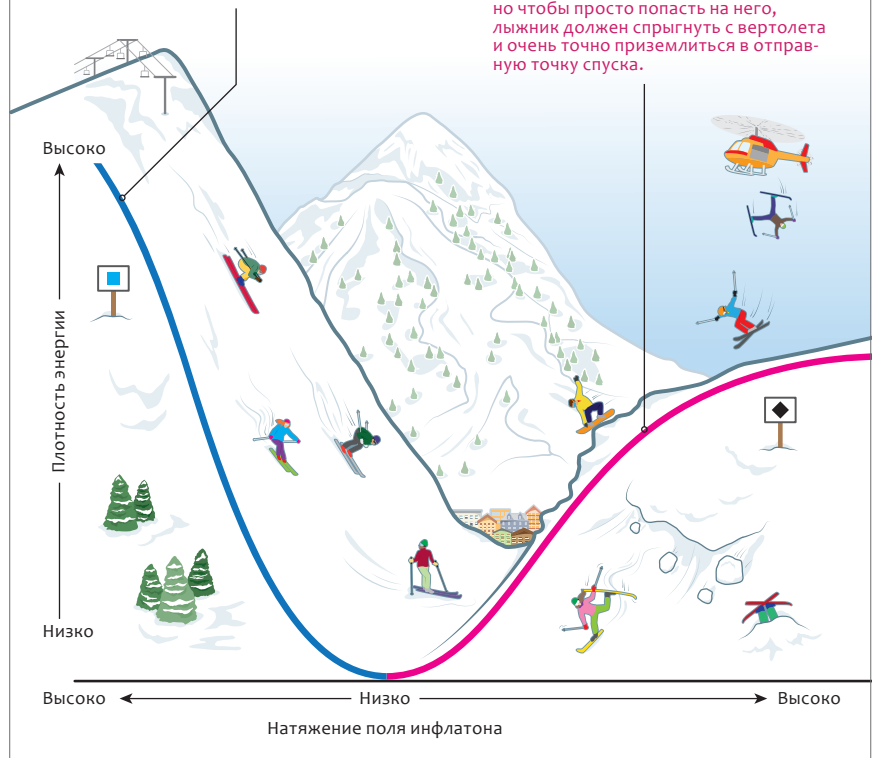
## ДВЕ ВЕРСИИ ТЕОРИИ

### Инфляция и горнолыжный спуск

Если инфляция произошла, то она должна была быть запущена гипотетической инфляционной энергией, вызываемой так называемым полем инфлатона, пронизывающим пространство. Различные варианты теории инфляции предлагают разные соотношения между натяжением поля инфлатона и плотность инфляционной энергии. Два из таких соотношений приводятся на рисунке. Первая кривая (синий) описывает традиционную модель инфляции из общепринятого учебника по космологии. Вторая кривая (розовый) показывает ситуацию, требующую специальных начальных условий и представляется очень маловероятной по сравнению с первой. Рядом с кривыми приводятся аналогии со спуском по горнолыжным склонам, из которой видно, почему второй класс моделей — а это как раз то, что не противоречит имеющимся наблюдательным данным, — довольно сложен для реализации.

Устойчивый равномерный склон, отражающий резкий рост плотности энергии, соответствует традиционной модели инфляции, напоминая хорошо предназначенный для катания на лыжах холм. Такие модели дают правдоподобную картину инфляции, потому что они начинаются с разумных значений инфляционной энергии (аналогично удобной точке старта на горнолыжном спуске, которая показана на рисунке), а потом стабильно и предсказуемо развиваются (как плавный спуск лыжника). Однако такая картина противоречит наблюдательным данным.

Такие варианты инфляционной теории носят название «модели с плато». Для возможности своей реализации они требуют крайне маловероятных начальных условий: поле инфлатона должно принять единственно нужное начальное значение в единственно возможный момент времени для запуска инфляционного «скачивания». Такие модели схожи с горнолыжным склоном, который мало того что грозит опасностью внезапного схода лавины, но чтобы просто попасть на него, лыжник должен спрыгнуть с вертолета и очень точно приземлиться в отправную точку спуска.



#### Лыжник на вершине холма

Для того чтобы в полной мере оценить вклад результатов эксперимента «Планк», следует более детально взглянуть на инфляционные модели, выдвигаемые защитниками инфляционной концепции. Инфляционная энергия мыслится возникающей из гипотетического поля, называемого инфлатоном, аналогично электромагнитному полю, которое пронизывает пространство и обладает натяжением (или некоторым значением) в каждой точке пространства. Поскольку инфлатон — гипотетическое поле, то теоретики могут



свободно допустить его таким, чтобы оно обладало гравитационными силами отталкивания, что и вызывает ускоренное расширение Вселенной. Плотность инфляционной энергии в данной точке пространства задается натяжением поля в этой точке. Связь натяжения поля и плотности энергии может быть представлена в виде кривой на графике, которая напоминает холм. Каждая из сотни имеющихся инфляционных моделей обладает особым видом склона этого холма. Склон определяет свойства Вселенной после окончания инфляционной стадии — например, будет ли Вселенная плоской и гладкой или нет, будет ли обладать масштабно инвариантными разновидностями температуры и плотности или нет.

С момента публикации данных «Планка» космологи как будто ощутили себя в нижеследующей ситуации. Представьте, что вы живете в изолированном городе, расположенном в долине, окруженной холмами. Единственные люди, которых вы когда-либо видели в городе, — это его жители. И вот однажды в городе появляется незнакомка. Каждый, разумеется, хочет узнать, как гостя добралась до города. Вы задаете этот вопрос городскому сплетнику (другими словами, местному оракулу), который утверждает, что она приехала на лыжах. Веря сплетнику, вы рассуждаете, что есть только два холма, которые ведут к долине. Любопытно, прочитав путеводитель, обнаружил бы в нем первый холм, до которого можно легко добраться с помощью подъемника. Все трассы с этого холма отличаются плавным спуском, видимость и состояние снега в целом хорошие. А вот второй совершенно иной, он не включен ни в одну из стандартных трасс катания на лыжах. И это не удивительно, потому что он грешит опасностью схода лавин. Один путь вниз в ваш город труднопроходим, потому что он берет начало на плоской гряде, а потом внезапно обрывается на крутом утесе. Кроме того, нет подъемника. Единственный возможный способ прокатится на лыжах с этого холма — это спрыгнуть с самолета на парашюте и приземлиться в определенном месте на хребте (с точностью в несколько сантиметров), а потом скатиться с определенной скоростью. Малейшая ошибка уведет лыжника с трассы далеко в сторону от долины, или лыжник и вовсе окажется в ловушке на вершине холма. В худшем случае сход лавины может начаться до того, как лыжник достигнет гребня, так что все закончится трагически. Если городской сплетник все-таки прав, говоря, что незнакомка прибыла на лыжах, то разумнее предположить, что она спустилась с первого холма.

Безумие — вообразить, что кто-то мог бы выбрать второй путь, потому что шансы успешно достичь города ничтожно малы по сравнению с безопасным спуском в первом варианте.

Однако вскоре вы замечаете кое-что в вашей госте. У нее нет билета на подъемник. Основываясь

на этом факте и продолжая свято верить городскому сплетнику, вы будете вынуждены признать, что путь незнакомки проходил как раз по второму холму. Или, быть может, она вообще не каталась на лыжах, и тогда нужно в первую очередь усомниться в правдивости «оракула».

Продолжим аналогичные рассуждения применительно к космологии. Так, если мнимый оракул сообщил нам, что Вселенная эволюционировала до своего современного состояния, пройдя стадию инфляции, то мы ожидаем, что кривая плотности инфляционной энергии будет подобна профилю холма, описанного в путеводителе. Действительно, у такого холма наиболее простой спуск от вер-



шины к подножию, а форма этого спуска задается наименьшим количеством регулируемых параметров и самыми простыми условиями, позволяющими начаться инфляции. В самом деле, до сих пор почти все учебники по инфляционной космологии представляли именно такой простейший вид кривой для потенциала инфляционного поля. В частности, плотность энергии вдоль этих простых кривых монотонно растет с изменением напряженности поля. Таким образом, можно получить начальное состояние поля инфлатона, для которого плотность энергии есть число, называемое планковской плотностью (в  $10^{120}$  раз больше, чем плотность поля инфлатона в современной Вселенной), то есть обозначает полную плотность энергии, доступной во Вселенной сразу после рождения. С этого удобного начального состояния, в котором единственная форма энергии есть инфляционная энергия, ускоренное расширение могло бы начаться



сразу. Во время инфляции натяжение поля инфлатона должно было бы естественно эволюционировать таким образом, чтобы плотность энергии медленно и плавно уменьшалась по кривой вниз, в долину, где минимум кривой и будет соответствовать современной Вселенной. Эта эволюция поля может рассматриваться аналогично скатыванию лыжника с холма. Все вышеописанное есть теория классической инфляции, описанной в учебниках.

Однако наблюдения «Планка» говорят о том, что такая история не может быть истинной. Простые инфляционные кривые описывают горячие и холодные пятна с большим отклонением от масштабно инвариантной картины, чем наблюдается, и с гравитационными волнами достаточно сильными, чтобы их можно было обнаружить. Если мы будем продолжать настаивать, что инфляция все-таки произошла, результаты «Планка» обязывают инфляционное поле спадать по более замысловатой траектории, подобно профилю второго холма из нашего примера с лыжницей — с высокой опасностью схода лавины и с плоским гребнем, который заканчивается крутым обрывом вниз, в долину. Вместо простого, плавно спадающего профиля эта кривая будет резко «дергаться» (образуя обрывы) от своего минимума до тех пор, пока не выйдет на плато (образуя хребет) при плотностях энергии, которые в миллиарды раз меньше планковской плотности, характеризующей раннюю Вселенную сразу после Большого взрыва. В этом случае плотность инфляционной энергии будет составлять ничтожно малую часть от общей плотности энергии Вселенной после Большого взрыва, слишком малую часть, чтобы сразу привести к ускоренному расширению Вселенной.

Поскольку Вселенная не находится в стадии инфляционного расширения, поле инфлатона может обладать любым начальным значением и меняться с головокружительной скоростью — как лыжник, прыгающий с вертолета. Однако инфляция может начаться, только если поле инфлатона в конечном итоге достигает значения, соответствующего точке вдоль плато, и если поле инфлатона будет меняться очень медленно. Точно так же, как для лыжника очень опасно падать с большой высоты на плоскую грядку с точно определенной скоростью и с последующим плавным спуском вниз, так и для поля инфлатона подобное почти невозможно. Другими словами, очень трудно подобрать скорость так, чтобы началась инфляционная стадия. Чтобы сделать все еще хуже: поскольку Вселенная не находится в стадии инфляции во время рассматриваемого периода после Большого взрыва, когда скорость инфляции замедляется, любые начальные возмущения или неоднородности распределения поля инфлатона будут увеличиваться; когда они вырастут до больших размеров, они будут препятствовать началу инфляционной стадии независимо от эволюции

поля инфлатона — по аналогии с тем, как сход лавины может блокировать лыжницу на гладком спуске вне зависимости от того, насколько удачно был начат спуск после прыжка с вертолета. Другими словами, принимая слова оракула на веру и настаивая на том, что инфляция все-таки произошла, мы получили бы очень странный вывод из данных «Планка», а именно — что инфляция началась с постоянной плотностью энергии, несмотря на все вытекающие отсюда проблемы. Или, быть может, в тот момент стоит поставить под сомнение авторитет оракула.

### Мультихаос

В реальности, конечно, никакого оракула в нашем распоряжении нет. Мы не можем просто принять предположение о том, что инфляция произошла, тем более что инфляция не дает простого объяснения наблюдательным особенностям Вселенной. Космологи должны оценивать теории путем применения стандартной научной процедуры. Насколько велика вероятность того, что инфляция произошла, с учетом того, что мы реально наблюдаем во Вселенной? В этом отношении неутешительно то обстоятельство, что текущие данные исключают простейшую инфляционную модель и склоняются к ее усложненным вариантам. Но, по правде говоря, последние наблюдения — это не первая проблема, с которой сталкивается теория инфляции. Скорее, эти результаты придали новый поворот давно назревшим вопросам. Например, мы должны рассмотреть, насколько разумно для Вселенной иметь начальные условия, необходимые для любого типа поля инфлатона вообще. Два невероятных условия должны быть удовлетворены для того, чтобы инфляция началась. Во-первых, вскоре после Большого взрыва существует область пространства, в которой квантовые флуктуации пространства-времени уменьшаются и исчезают и пространство-время начинает подчиняться классическим уравнениям общей теории относительности Эйнштейна. Во-вторых, область пространства должна быть достаточно плоской и обладать достаточно гладким распределением энергии, чтобы инфляционная энергия могла расти и доминировать над другими формами энергии. Некоторые теоретические оценки показывают, что вероятность существования такой области с нужными характеристиками сразу же после Большого взрыва меньше, чем вероятность найти снежную гору, оборудованную подъемником, и ухоженные лыжные трассы посреди пустыни.

Более важно то, что если оказалось бы легко найти область пространства, возникшую после Большого взрыва, плоскую и достаточно гладкую, чтобы инфляция могла начаться, то инфляция стала бы вовсе не нужной. Напомним, что мотивация для внедрения инфляционной стадии — это

объяснение, каким образом современная видимая Вселенная стала такой, какой мы ее наблюдаем. Если для начала инфляции требуются те же самые свойства с той лишь разницей, что они необходимы в меньшей области пространства, то вряд ли такие рассуждения можно назвать прогрессом.

Однако такие вопросы — лишь начало проблемы. Инфляция не только требует трудных для реализации начальных условий — инфляцию невозможно восстановить, если она началась. Это последнее восходит к природе квантовых флуктуаций пространства-времени. Такие флуктуации вызывают напряжение поля инфлатона, поле меняется по пространству. В результате в некоторых областях пространства инфляция уже заканчивается, а в других еще нет. Квантовые флуктуации было принято считать крошечными, однако в 1983 г. теоретики, включая Стейнхарда, пришли к выводу, что большие квантовые скачки в инфляционном поле хоть и редки, но возможны и могут полностью изменить инфляционную историю. Большие прыжки могут увеличить натяжение поля инфлатона до значений, существенно превышающих среднее, приводя к тому, что в таких областях инфляция будет происходить значительно дольше. Хотя большие скачки редки, но области, которые благодаря им подвергаются расширению, достигают размеров, значительно больших соседних областей, и, следовательно, быстро начинают доминировать в пространстве. За мгновения области, где инфляционное расширение прекратилось, окажутся окруженными по-прежнему раздувающимися областями. Затем процесс повторится. В самой большой области натяжение инфляционного поля будет меняться таким образом, что плотность энергии начнет уменьшаться и инфляция будет заканчиваться, но редкие большие квантовые скачки будут продолжать удерживать инфляционное расширение в некоторых областях, создавая еще большие объемы. Этот процесс будет продолжаться до бесконечности.

Таким образом, инфляция длится вечно, генерируя бесконечное количество областей, в которых она закончилась и образовалась отдельная вселенная. Только в таких областях, где инфляция закончилась, темп расширения пространства падает настолько, что могут образовываться галактики, звезды, планеты и жизнь. Наиболее тревожащим следствием такой модели вечной инфляции представляется то, что космологические свойства в каждой области различны из-за случайностей начальных квантовых флуктуаций. В целом большинство вселенных не становятся ни плоскими, ни свободными от деформаций. Распределение вещества не будет гладким. И картина распределения горячих и холодных пятен в анизотропии реликтового излучения не будет масштабно инвариантной. Области будут характеризоваться

бесконечным числом возможных значений параметров, включая в том числе и нашу собственную Вселенную, и никакой из вариантов не будет предпочтительнее другого. В результате получается конструкция, которую космологи называют мультивселенной (мультимиром). Поскольку каждая область может обладать любыми физически мыслимыми законами, концепция мультимира не объясняет, почему наша Вселенная обладает особыми свойствами, которые мы наблюдаем. Все особенности нашей Вселенной оказываются чисто случайными. Возможно даже, что такая картина слишком оптимистична. Некоторые ученые спорят, может ли какая-либо область пространства эволюционировать в видимую нами Вселенную. Вместо вечной инфляции может реализоваться чисто квантовый мир с неопределенными и случайными флуктуациями повсюду, даже в тех областях, где инфляция заканчивается. Авторы хотели бы предложить новый термин — «мультихаос» — как более удачный для описания нерешенного исхода вечной инфляции, заключается ли она в наличии бесконечного множества областей со случайно распределенными свойствами или же в наличии квантового беспорядка. С точки зрения авторов, нет никакой разницы в том, какое из описаний более корректно. В любом случае мультихаос не делает таких предсказаний относительно свойств нашей наблюдаемой Вселенной, чтобы она стала бы более вероятной. Хорошая же научная теория должна объяснять, почему мы наблюдаем именно одно, а не другое. Мультихаос не проходит этот основной тест.

### Смена парадигмы

Если принимать во внимание все обсужденные проблемы, предположение того, что инфляция не произошла, заслуживает серьезного рассмотрения. Если мы сделаем шаг назад, то существуют две логические возможности. Либо у Вселенной было начало, называемое Большим взрывом, либо у нее не было начала и вместо Большого взрыва был так называемый Большой отскок — переход от какой-то предыдущей фазы космологического развития к современной расширяющейся фазе. Хотя большинство космологов предпочитают концепцию Большого взрыва, на данный момент нет никакого резона отдавать предпочтение тому или иному названию события, произошедшего 13,7 млрд лет назад. В случае Большого отскока, в противоположность Большому взрыву, не требуется последующего периода инфляции для создания Вселенной современного вида. Другими словами, Большой отскок воспринимается как резкий отход от парадигмы инфляции. Модель Большого отскока дает такой же эффект, как модель Большого взрыва совместно с инфляцией, потому что до Большого отскока процесс медленного сжатия,

растянутого на миллиарды лет, вполне мог сгладить и сделать плоской Вселенную. Может показаться нелогичным, что медленное сжатие обладает тем же свойством, что и быстрое расширение, но есть простой аргумент, показывающий, что так и должно быть.

Напомним, что без инфляции медленно расширяющаяся Вселенная может стать более искривленной, деформированной и неравномерной во времени за счет гравитационных эффектов пространства и вещества. Представьте, что вы смотрите кинофильм, в котором этот процесс запущен вспять: большая, сильно искривленная, деформированная и неоднородная Вселенная постепенно сжимается и становится плоской и однородной. Таким образом, гравитация работает как бы реверсивно, разглаживая пространство и вещество в медленно сжимающейся Вселенной.

Как и в случае инфляции, квантовая физика изменяет картину обычного сглаживания и в модели Большого отскока. Квантовые флуктуации меняют скорость сжатия от точки к точке, поэтому некоторые области испытывают отскок и начинают расширяться и охлаждаться раньше других. Ученые смогли построить модели, в которых температурные флуктуации после Большого отскока зависят от скорости сжатия таким образом, чтобы соответствовать наблюдаемой «Планком» анизотропии реликтового излучения. Другими словами, сжатие до Большого отскока может делать то же самое, для чего была в свое время изобретена инфляция. Вместе с тем теории отскока имеют важное преимущество по сравнению с инфляционными моделями — они не порождают мультихаоса. Когда начинается фаза сжатия, Вселенная уже обладает большими размерами и описывается классической теорией Эйнштейна. Отскок происходит до того, как Вселенная сожмется до таких микроскопических размеров, когда квантовые эффекты станут значимыми. В результате никогда не наступает стадия, описываемая квантовой физикой, и, в отличие от модели Большого взрыва, нет нужды придумывать, как перейти от квантового описания к классическому. Поскольку во время сглаживания нет инфляции, которая вызвала бы появление редких больших квантовых флуктуаций и резкого увеличения объема, сглаживание в процессе сжатия не приводит к появлению многих вселенных. Последние теоретические работы дают представление о механизмах того, как можно было бы провести Вселенную от сжатия к расширению, построив, таким образом, космологию Большого отскока.

### Наука без эмпирической проверки?

Учитывая проблемы с инфляционными моделями и возможности космологических моделей с отскоком, можно было бы ожидать оживленных дискуссий среди ученых, акцентированных на том, как

различить эти две теории на основе наблюдательных данных. Однако существует одна тонкость: инфляционная космология, насколько мы сегодня ее понимаем, не может быть оценена на истинность с помощью научных методов. Как обсуждалось выше, ожидаемые выводы инфляционной модели могут быть легко изменены при варьировании начальных условий, при изменении профиля кривой инфляционной энергии или просто замечанием о том, что инфляционная картина приводит к вечной инфляции и к мультихаосу. Каждая по отдельности и все вместе, эти особенности делают инфляцию настолько гибкой, что ни одно наблюдение не сможет ни доказать, ни опровергнуть ее. Некоторые ученые признают, что инфляция непроверяема, но все же не могут от нее отказаться. Исследователи предлагают изменения в самом научном познании путем отбрасывания одного из его основополагающих свойств — проверки наблюдениями или экспериментами. Такое заявление вызвало бурные дискуссии о природе науки и ее возможном пересмотре, продвигая идею новой, неэмпирической науки.

Распространенное заблуждение заключается в том, что эксперименты могут быть использованы для фальсификации теории. На практике опровергнутая теория дает меньше шансов, чтобы как-то ее залатать. Теория становится все более архаичной и искусственно усложненной для соответствия новым наблюдениям и, наконец, доводится до такого состояния, когда ее предсказательная сила практически сводится к нулю. Эта предсказательная сила характеризуется тем, сколько возможностей исключает теория. Чем меньше шансов подправить такую теорию, тем меньшей мощностью она обладает. Теория, подобная модели мультихаоса, не исключает ничего и поэтому обладает нулевой мощностью. Декларирование пустой теории как бесспорного стандарта требует каких-то аргументов за пределами науки. Не считая мнения оракула, единственная альтернатива — это привлечение авторитетов. История учит нас, что это неверный путь.

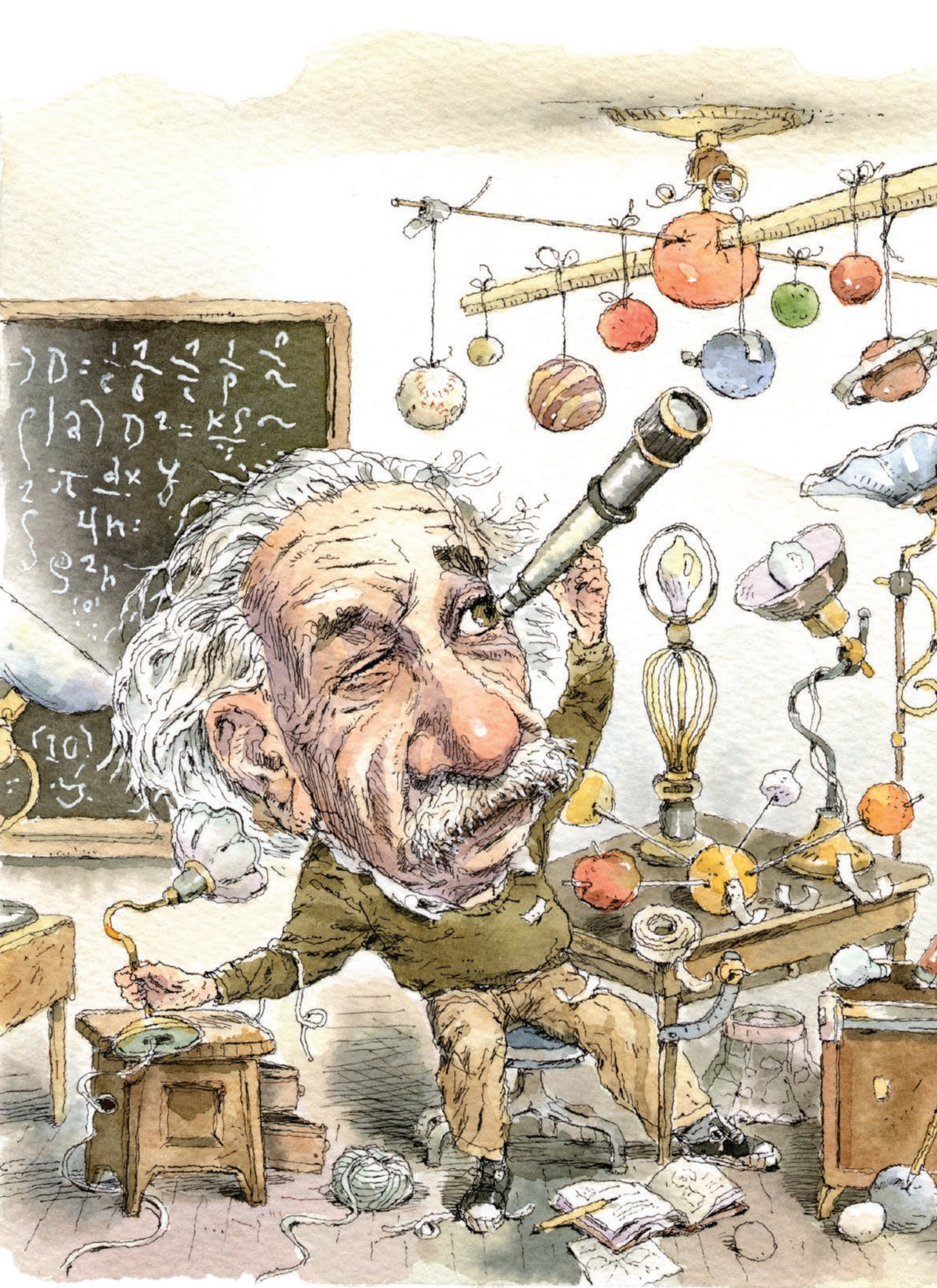
Сегодня нам повезло вскрыть с помощью наблюдений острые проблемы теории. Тот факт, что наши лидирующие концепции не разработаны, — это историческая возможность для прорыва теорий. Вместо того чтобы закончить историю о ранней Вселенной, мы должны признать, что книга космологии широко открыта. ■

**Перевод: О.С. Сажина**

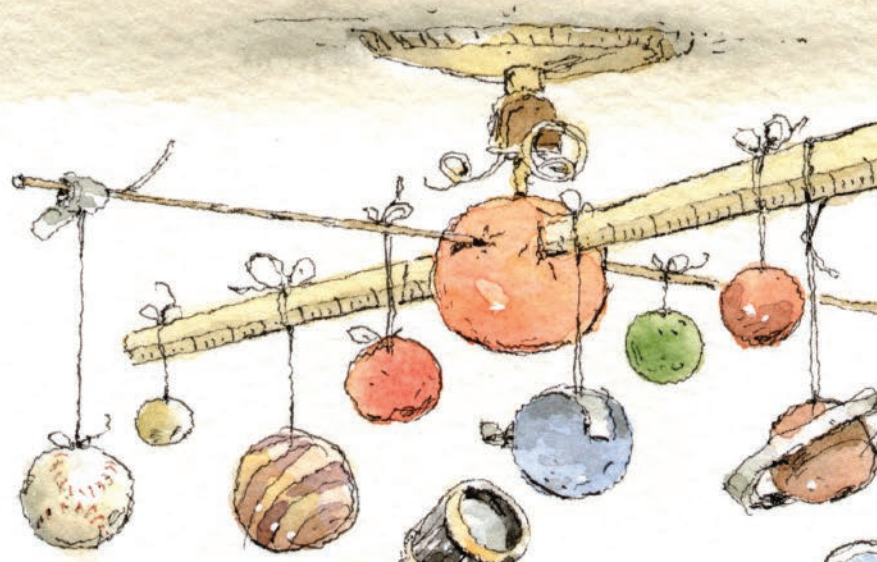
### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

■ Inflationary Paradigm in Trouble after Planck 2013. Anna Ijjas et al. in *Physics Letters B*, Vol. 723, Nos. 4–5, pages 261–266; June 25, 2013.





$\rightarrow D = \frac{1}{c} \frac{1}{b} \frac{1}{a} \frac{1}{p} \frac{1}{r} \frac{1}{s}$   
 $(1/2) D^2 = \frac{K}{S} \frac{1}{r}$   
 $\int \pi dx \gamma$   
 $4h:$   
 $9^2 h$   
 $(10)$   
 $5$







# В ЧЕМ ЭЙНШТЕЙН ОШИБСЯ?

КОСМОЛОГИЯ

Каждый совершает ошибки, однако  
ошибки легендарного ученого  
особенно важны

Лоуренс Краусс

**Подобно всем другим людям,** Альберт Эйнштейн совершал ошибки и, как многие другие физики, иногда их публиковал. Ошибки большинства из нас настолько незначительны, что довольно быстро забываются. Высказывания же Эйнштейна, даже будучи ошибочными, все равно заслуживают пристального внимания, потому что помогают лучше понять ход его рассуждений. Такой процесс осмысления фундаментальных концепций позволяет разобраться в изменениях, происходящих в научных представлениях о Вселенной. Ошибки Эйнштейна обнажают и выставляют на передний край ключевые научные проблемы. Приближаясь к границам нашего представления о мире, трудно понять, насколько хороши идеи, написанные на бумаге, соответствуют действительности и насколько удачна та или иная новая идея — приведет ли она к научному прорыву или заведет в тупик.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Несмотря на поразительную научную интуицию, Эйнштейн иногда не понимал до конца смысла своих собственных наиболее значимых идей или забывал их значение. Так, Эйнштейн пренебрег важностью гравитационного линзирования, сомневался в реальности гравитационных волн и не смог предугадать открытия расширения Вселенной.
- Изучение ошибок Эйнштейна помогает понять ход его мыслей, а также проследить историю зарождения трех из важнейших разделов современной космологии.

## ОБ АВТОРЕ

**Лоуренс Краусс** (Lawrence M. Krauss) работает в Государственном университете Аризоны и в физическом отделении Школы изучения Земли и космоса. Автор девяти книг включая бестселлеры «Физика "Звездного пути"» (*The Physics of Star Trek*) и «Вселенная из ничего» (*A Universe from Nothing*), а также продюсер документального фильма «Неверующие» (*The Unbelievers*), посвященного научному подходу к изучению мира.



На протяжении многих лет Эйнштейн — человек, дерзко пересмотревший представления о физической сущности пространства и времени, — недооценивал собственные открытия и удивительно часто проходил мимо идей, легших в основу целых разделов современной космологии. Так, им самим были недооценены идеи о гравитационном линзировании, о гравитационных волнах и об ускоренном расширении нашей Вселенной (в работе «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле» (1936) Эйнштейн действительно писал о невозможности наблюдения этого явления, однако добавлял, что это связано с небольшой разрешающей способностью имеющихся на тот момент телескопов. — Примеч. пер.).

### Искажающие линзы Эйнштейна

В случае гравитационных линз главной ошибкой Эйнштейна было то, что он недооценил один из важнейших своих результатов: искривление лучей в гравитационном поле. В декабре 1936 г. он опубликовал короткую статью в журнале *Science* с названием «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле». Статья начинается со старомодного отступления, подобного которому уже не найти в современной научной литературе: «Некоторое время тому назад меня навел Руди Мандл (R.W. Mandl) [чешский инженер] и попросил опубликовать результаты небольшого расчета, который я провел по его просьбе. Уступая его желанию, я решил напечатать эту заметку».

«Небольшой расчет» был посвящен исследованию возможности экстремального отклонения света в гравитационном поле. Эйнштейн показал, что если рассмотреть лучи света, идущие от некоторой звезды и проходящие на малом расстоянии от достаточно массивного объекта, то эти лучи под действием гравитационных сил могут так сильно искривляться, что будут сближаться, образуя или увеличенное изображение звезды, или несколько изображений звезды. Другими словами, все вышеописанное сродни искривлению лучей света при проходе через оптическую линзу — отсюда и название эффекта: «гравитационное линзирование». Этот эффект со временем превратился

в мощнейший наблюдательный инструмент в современной космологии, поскольку с его помощью можно узнать распределение массы во Вселенной — даже такой, которая невидима в телескопы (так называемая темная материя).

Эйнштейн не дал исчерпывающей характеристики величины эффекта гравитационного линзирования и не оценил его важности. В той статье 1936 г. он сделал вывод о том, что эффект увеличения числа изображений звезды (фоновой по отношению к массивному объекту), получающегося за счет прохождения света в гравитационном поле, будет настолько мал, что не может наблюдаться. Такой разочарованный вывод перекликается со вступлением к статье, как бы подчеркивая незначительность рассматриваемой задачи. С точки зрения математических выкладок Эйнштейн был прав, однако он не задался вопросом о том, что могут быть и другие объекты, помимо звезд, для которых эффект гравитационного линзирования может быть сильным и вполне наблюдаемым.

Недалновидность Эйнштейна в этом вопросе тем более удивительна, что отклонение света массивным объектом — ключевое наблюдение, которое предсказывает общая теория относительности. В 1919 г. экспедиция под руководством физика Артура Эддингтона (Arthur Stanley Eddington) наблюдала солнечное затмение и определила, что свет звезд, проходящий вблизи солнечного диска, отклоняется в точности согласно предсказанию теории Эйнштейна. Новость о наблюдательном подтверждении общей теории относительности появилась на первых страницах газет по всему миру. Английская экспедиция подтвердила теоретическую работу немецкого ученого — после Первой мировой войны такая новость импонировала публике. Эйнштейн получил мировую известность и славу гениального ученого.

Есть и другой поворот истории. Эйнштейн сделал расчет отклонения лучей на несколько лет раньше, в 1912 г. Он опять-таки не распознал всей важности полученного результата для космологии. Или даже еще хуже — он допустил существенную математическую ошибку, использовав раннюю версию общей теории относительности, которая предсказывала величину угла отклонения

света в гравитационном поле вдвое меньше истинного значения. Экспедиция для поиска отклонения лучей света от звезд вблизи солнечного диска была запланирована на 1914 г. — и она не состоялась, потому что в тот год началась Первая мировая война. Эйнштейну повезло, что наблюдение не было проведено, — ведь иначе первое же предсказание теории оказалось бы не согласованным с наблюдательными данными. И кто знает, как это повлияло бы на дальнейшую научную судьбу Эйнштейна и на развитие науки в целом.

После публикации статьи в 1936 г. Эйнштейн коротким письмом редактору очаровательно обесценил собственные результаты: «Позвольте мне также поблагодарить вас за поддержку в опубликовании этой небольшой статьи, которую мистер Мандл принудил меня написать. Работа малоценна, но пусть она хотя бы бедного парня осчастливит».

Эйнштейн упустил из рассмотрения тот факт, что звезды объединяются в галактики, о чем не уставал твердить Фриц Цвикки (Fritz Zwicky) — блестящий, хотя и вспыльчивый астроном из Калифорнийского технологического института. Несколько месяцев спустя после работы Эйнштейна Цвикки пытался опубликовать соответствующую работу в журнале *Physical Review*. Эффект гравитационного линзирования на отдельных звездах может быть действительно ничтожно мал, но, как утверждал Цвикки, гравитационное линзирование на галактиках, состоящих из сотен миллиардов звезд, может быть вполне наблюдаемым.

Статья Цвикки 1937 г. объемом всего в одну страницу была очень примечательна. Ученый предложил три способа использования эффекта гравитационного линзирования, что предвосхитило практически все достижения астрономов в последующие десятилетия. Во-первых, это тест общей теории относительности. Во-вторых, это использование гравитационного линзирования на галактиках для усиления яркости удаленных объектов (которые иначе оказались бы ненаблюдаемыми). В-третьих, это применение гравитационного линзирования для измерения массы крупномасштабных структур во Вселенной. Цвикки упустил четвертое важное приложение — о возможности использования эффекта гравитационного линзирования для изучения геометрии и эволюции Вселенной на сверхбольших масштабах.

В целом можно заключить, что трудно даже представить более недооцененный научный результат.

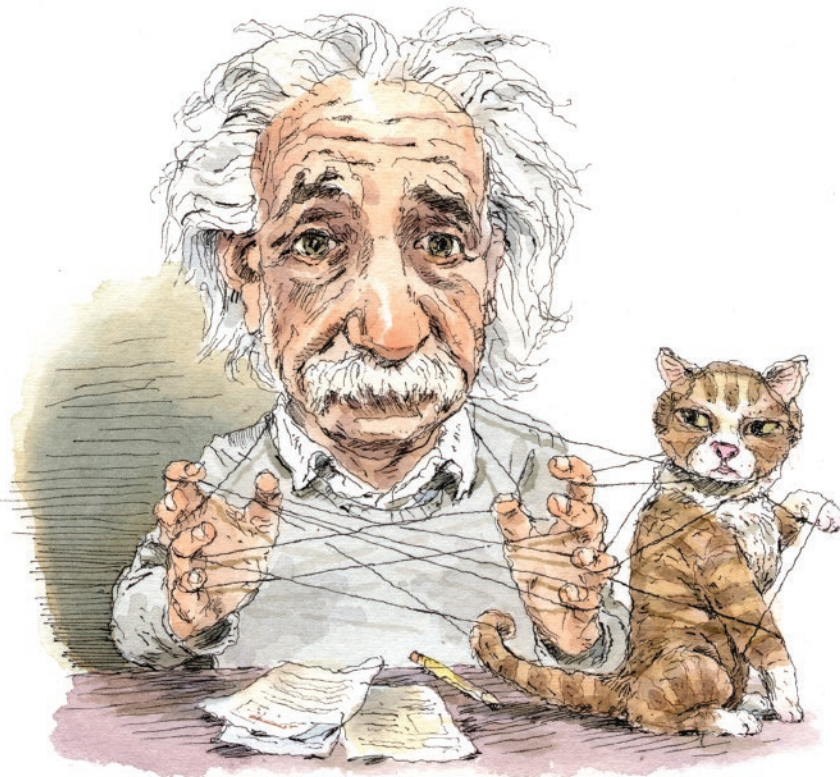
### Загнанные в тупик миражом сингулярности

Из уравнений Эйнштейна естественным образом следует существование гравитационных волн — ряби пространства-времени. Эйнштейн осознал это почти сразу, однако в процессе работы отступил от их правильного описания. В современной астрономии обнаружение гравитационных волн от столкновения черных дыр и взрывающихся звезд или обнаружение реликтовых гравитационных волн, эха инфляционной стадии эволюции ранней Вселенной, обещает стать гигантским прорывом на пути исследования природы.

Эйнштейн предсказал существование гравитационных волн вскоре после завершения им общей теории относительности в 1916 г. Математический аппарат, описывающий гравитационные волны, довольно сложен, но физическое обоснование их существования вполне наглядно. Согласно законам электромагнетизма, при движении электрического заряда туда и обратно будет генерироваться колебательное возмущение электромагнитного поля, т.е. свет. Аналогично при движении материального тела туда и обратно, например по поверхности стоячей воды, будут генерироваться волны. Эйнштейн показал, что материальные тела искривляют пространство, — таким образом, должно происходить колебательное возмущение пространства при движении массивных тел. Однако позже Эйнштейн стал сомневаться в физической реальности таких возмущений.

Эйнштейн предсказал существование гравитационных волн вскоре после завершения им общей теории относительности в 1916 г. Математический аппарат, описывающий гравитационные волны, довольно сложен, но физическое обоснование их существования вполне наглядно. Согласно законам электромагнетизма, при движении электрического заряда туда и обратно будет генерироваться колебательное возмущение электромагнитного поля, т.е. свет. Аналогично при движении материального тела туда и обратно, например по поверхности стоячей воды, будут генерироваться волны. Эйнштейн показал, что материальные тела искривляют пространство, — таким образом, должно происходить колебательное возмущение пространства при движении массивных тел. Однако позже Эйнштейн стал сомневаться в физической реальности таких возмущений.

Эйнштейн рассказал о сути своих сомнений в вышедшей в 1936 г. статье.



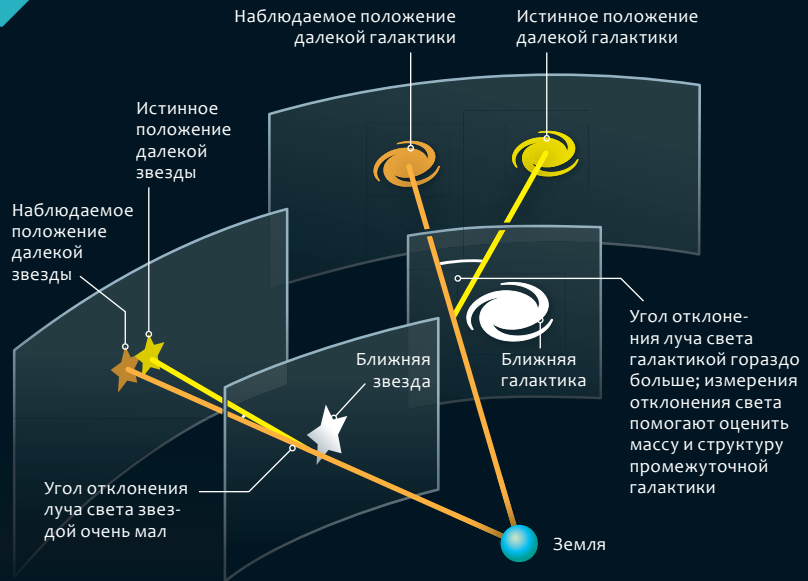


## Промахи Эйнштейна

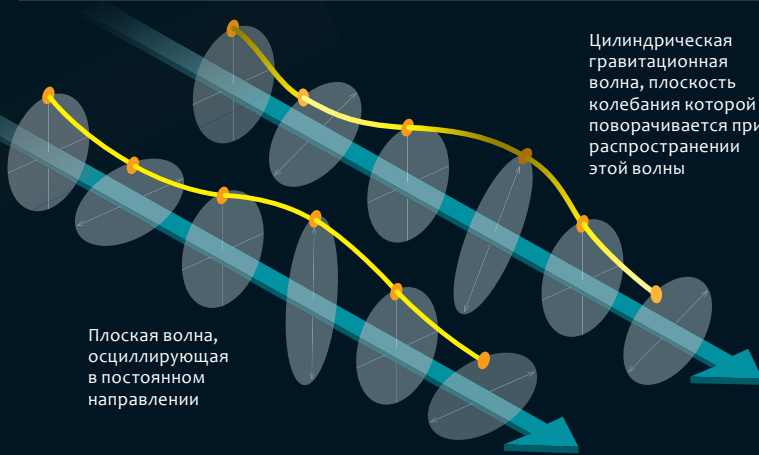
Эйнштейн неопозволительно недооценил выводы трех важнейших задач. Выброшенные им идеи впоследствии оказались определяющими для современной космологии. Так, гравитационное линзирование используется для поиска скоплений галактик, гравитационные волны (в существовании которых Эйнштейн изначально сомневался) могут помочь исследовать первые моменты после Большого взрыва, а космологическая постоянная способна регулировать эволюцию Вселенной.

### Гравитационное линзирование

Когда в 1936 г. Эйнштейн опубликовал статью о гравитационном линзировании (отклонении лучей света в гравитационном поле согласно общей теории относительности), он ошибочно заключил, что этот эффект — ненаблюдаемый. Он рассуждал только об эффекте отклонения света одной звезды другой звездой, но не учел возможность линзирования галактики на галактике. В первоначальной версии статьи, написанной в 1912 г., Эйнштейн использовал недоработанную формулу своей теории, а потому величина угла отклонения луча света в гравитационном поле была слишком мала. Если бы он сразу опубликовал это ошибочное предсказание, то это могло бы очень сильно повлиять на дальнейшую судьбу всей теории как неподтвержденной наблюдательными данными. Это была бы действительно большая ошибка.



### Гравитационные волны



Общая теория относительности предполагает существование гравитационных волн, ряби пространства-времени, но сам Эйнштейн первоначально отклонил собственный прогноз. Он был спасен от публикации ошибочных выводов благодаря другой ошибке — восприняв рецензирование как оскорбление. Отозвав статью из журнала, взбешенный критикой рецензента, Эйнштейн обнаружил ошибку в своих расчетах: он пытался построить решение для гравитационных волн, колеблющихся в неизменном направлении своего распространения. Впоследствии Эйнштейн вывел правильное выражение для волн, направление колебаний которых менялось по кругу при их распространении. К настоящему времени существование гравитационных волн косвенно подтверждено

### Космологическая постоянная

В 1917 г. Эйнштейн ввел в уравнения общей теории относительности новый член, называемый космологической постоянной, — это был искусственный математический способ зафиксировать Вселенную статичной. Когда Эйнштейн узнал, что Вселенная расширяется, он отказался от космологической постоянной. Он не осознал важности этой константы — того, что она выступает естественной частью теории. Оказалось, что космологическая постоянная характеризует энергию пустого пространства и может объяснить наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной.

Эйнштейновские уравнения поля

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**R** и **g** задают геометрию пространства-времени

**Λ** (лямбда) — космологическая постоянная, введенная для описания силы отталкивания в пространстве

**G** — гравитационная постоянная

**c** — скорость света

**T** — плотность энергии вещества и излучения



Она была напечатана в престижном по тому времени журнале *Physical Review*, в котором была опубликована и работа Цвикки по гравитационному линзированию. Комичная история о том, что Эйнштейн сначала допустил ошибку в своей статье, а потом ее обнаружил, представлена в несколько искаженном виде. Эйнштейн переехал в США из Германии всего тремя годами раньше и еще не привык к жизни в новом для него обществе. Работа Эйнштейна, озаглавленная «Существуют ли гравитационные волны?» была сопровождена им письмом к коллеге Максу Борну (Max Born): «Вместе с одним молодым сотрудником я пришел к интересному выводу о том, что гравитационных волн не существует, хотя в первом приближении их наличие можно было предполагать. Отсюда следует, что релятивистские нелинейные уравнения общей теории относительности могут рассказать нам больше, а точнее ограничить нас больше, чем это казалось до сих пор».

Статьи, которую Эйнштейн направил в журнал *Physical Review*, больше не существует, потому что она никогда не была там опубликована. После обычной процедуры редактор журнала отослал на рецензию эту статью (написанную Эйнштейном в соавторстве со своим научным сотрудником Натаном Розеном (Nathan Rosen) из Института перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси). Позже Эйнштейну был направлен критический отзыв анонимного рецензента, требовавшего ответов на некоторые вопросы. Эйнштейн был ошеломлен такой процедурой, расходящейся с нормой, принятой в немецких научных журналах.

Эйнштейн написал надменное письмо редактору: «Мы (мистер Розен и я) послали вам нашу рукопись для публикации, а до ее публикации мы не уполномочили вас показывать нашу работу специалистам. В любом случае я не считаю нужным отвечать анонимному рецензенту. Инцидент вынуждает меня опубликовать работу в другом издании». Эйнштейн никогда больше не направлял статьи в *Physical Review*. И так и не прочитал письмо рецензента, весьма уважаемого американского космолога Говарда Робертсона (Howard Percy Robertson), который правильно объяснил основную ошибку статьи Эйнштейна.

Эйнштейн и Розен попытались выписать уравнение плоской гравитационной волны (аналогично той, что появляется на поверхности стоячей воды на очень большом расстоянии от брошенного камня). В процессе решения этой задачи они столкнулись с сингулярностью, в которой физические характеристики должны были принимать бесконечно большое значение. Такой, казалось

бы, бессмысленный результат и стал поводом заключить, что гравитационные волны существовать не могут. В действительности Эйнштейн неправильно интерпретировал математические выводы собственной теории. Согласно общей теории относительности, законы природы не зависят от того, в какой системе координат они рассматриваются. Многие на первый взгляд странные результаты, которые получаются из решений уравнений теории относительности, в действительности не физические — это артефакты, следствия неправильно выбранной системы координат. Например, черная дыра окружена воображаемой сферической поверхностью, называемой горизонтом событий, находясь внутри которой нельзя избежать падения в центральную сингулярность. При задании геометрии (*метрики*. — Примеч. пер.) вокруг черной дыры многие величины — в том числе расстояние и время — «плохо себя ведут» на гори-

## Самая известная ошибка Эйнштейна — модификация общей теории относительности с целью избежать расширения Вселенной. Эта ошибка так популярна, потому что Эйнштейн сам назвал ее промахом

зонте событий. Однако появляющиеся бесконечности — не физические. В другой системе координат, определяемой, например, лучами света, бесконечные значения параметров задачи исчезают. То же самое верно и в случае гравитационных волн. Не существует единой координатной системы, в которой плоские гравитационные волны могут быть описаны без появления кажущейся сингулярности, но все эти системы нефизичны. При использовании двух различных, перекрывающихся координатных систем сингулярности исчезают.

Критический отзыв не поколебал уверенности Эйнштейна в его результатах, и он перенаправил статью в научный журнал Института Франклина. Однако до того как статья была там опубликована, Эйнштейн понял свою ошибку и проинформировал об этом редактора. Окончательный вариант, «О гравитационных волнах», представлял собой решение уравнений общей теории относительности в такой системе координат (подходящей для цилиндрических, а не плоских гравитационных волн), где не появляются сингулярности, что и предлагал сделать Робертсон.

Какими же путями Эйнштейн пришел к правильному выводу? Согласно версии сотрудника

Эйнштейна Леопольда Инфельда (Leopold Infeld), Робертсон позвал его к себе и деликатно указал на ошибку в первоначальном варианте статьи и предложил способ возможного решения. Выслушав Робертсона, Инфельд все передал Эйнштейну. По всей видимости, Робертсон не показал, что был тем самым рецензентом, и Эйнштейн никогда не упоминал, что ознакомился с комментариями рецензента. Получилось, что Эйнштейн так и не опубликовал свою ошибочную статью, отрицающую существование гравитационных волн, — благодаря вмешательству добросовестного рецензента.

Не так хорошо Эйнштейн разбирался в физике черных дыр. Он запутался с появлением нефизической сингулярности на горизонте событий и предположил, что природа должна как-то ее запретить. Эйнштейн утверждал, что закон сохранения углового момента должен был бы привести к тому, что частицы в сжимающемся объекте вращались по устойчивым орбитам конечного радиуса и, таким образом, горизонт событий вообще не образовывался бы. Эйнштейн никогда не считал черные дыры реальными объектами.

### Блестящий промах

Самая известная ошибка Эйнштейна — модификация общей теории относительности с целью избежать расширения Вселенной. Эта ошибка так популярна, потому что Эйнштейн сам назвал ее промахом. Одним из следствий завершённой в 1915 г. общей теории относительности было существование бесконечного, статичного и пустого пространства вокруг нашей Галактики. Однако Эйнштейн признавал, что вызванная наличием вещества гравитационная сила (как и теории Ньютона) — это универсальная сила притяжения и, следовательно, статическое решение невозможно. Гравитация должна приводить к коллапсу вещества.

В статье 1917 г. «Космологические аспекты общей теории относительности» Эйнштейн ввел в уравнения поля дополнительную константу, чтобы обеспечить статичность Вселенной. Космологическая постоянная была призвана обеспечить отталкивание как противовес гравитационному притяжению. Не было никаких физических оснований для введения такой постоянной, кроме как предотвращение коллапса.

В течение последующих десяти лет стали появляться свидетельства против статической модели Вселенной. Вначале Эйнштейн устойчиво придерживался своей позиции. В 1927 г. (за два года до знаменитого открытия Эдвином Хабблом (Edwin Hubble) разбегания галактик) бельгийский физик и католический священник Жорж Леметр (Georges

Lemaître) разработал модель расширяющейся Вселенной, дополнив ее вариантом Большого взрыва (*впервые модель расширяющейся Вселенной была предложена советским ученым Александром Фридманом в 1924 г. — Примеч. пер.*). Позже Леметр вспоминал комментарий Эйнштейна: «Ваши расчеты верны, но физическая суть отвратительна!»

В конце концов Эйнштейн возвратился к той идее, с которой начал. Он посетил Эдвина Хаббла, побывал на его телескопе в Обсерватории Маунт-Вильсон близ Пасадены в Калифорнии. В 1933 г. Эйнштейн согласился с космологической моделью Леметра, сказав: «Это самое изящное и исчерпывающее объяснение Творения, которое я когда-либо слышал».

## Попытки Эйнштейна создать единую теорию поля не привели к успеху, но его ошибочные предположения завершились в будущем важными научными прорывами

От Эйнштейна не ускользнуло, что для описания расширяющейся Вселенной больше не было необходимости в космологической постоянной, которая изначально была введена для обеспечения статичности Вселенной. Даже в 1919 г. он написал, что эта постоянная «серьезно вредила красоте формализма теории». В часто цитируемом фрагменте из книги Георгия Гамова (George Gamov) «Моя мировая линия: неформальная автобиография» автор приводит такой анекдот: «Много позже, когда я обсуждал космологические проблемы с Эйнштейном, он отметил, что введение космологической постоянной было самой большой ошибкой в его жизни».

Будущее показало, что Эйнштейн ошибался, считая космологическую постоянную бесполезной. В то же время ее добавление в теорию было ошибкой, причем по двум причинам. Во-первых, если бы Эйнштейн не отказался от нее, он смог бы выявить противоречие модели статической Вселенной общей теории относительности. Во-вторых, поскольку в то время никто не подозревал о динамичности Вселенной на больших масштабах, Эйнштейн смог бы предсказать космологическое расширение, вместо того чтобы принять его позже как следствие наблюдения.

Введение космологической постоянной таит в себе и более фундаментальную ошибку. Будучи искусственно введенной в уравнение общей теории относительности, эта константа не выполняет предписанную ей функцию, не задает

действительно статическую Вселенную. Это произошло потому, что Эйнштейн в очередной раз использовал для расчетов неподходящую систему координат. С физической точки зрения концепция Эйнштейна была также неверна. На небольшом промежутке космологического времени введением подходящей «отталкивающей» постоянной действительно можно сбалансировать гравитационное притяжение вещества. Однако даже небольшое возмущение приведет либо к стремительному расширению, либо к стремительному сжатию. С космологической постоянной или без нее Вселенная обязана быть динамичной.

Космологическая постоянная оказалась более долговечной, чем породившие ее знания по астрономии. Изначально она была искусственным дополнением к уравнениям общей теории относительности, но позже, когда на космологические задачи смогли взглянуть с точки зрения квантовой физики, эта константа оказалась характеристикой энергии пустого пространства. Фактически квантовая физика потребовала наличия такой константы. Кроме того, энергия пустого пространства — предмет не только сугубо теоретических исследований. Согласно независимым наблюдениям двух научных групп в 1998 г., наша Вселенная не просто расширяется, но расширяется с ускорением, и то, что этим ускорением управляет, действует аналогично «отталкивающей» космологической постоянной. В свете такого открытия можно сказать, что Эйнштейн действительно ошибся дважды: исходя из неверных предпосылок, вписал в уравнения общей теории относительности космологическую постоянную, а потом сам же от нее и отказался, не изучив всех последствий ее введения.

### Ошибка, никогда им не признанная

Ошибки Эйнштейна обладали огромным научным потенциалом, потому что были основаны на грандиозных и провокационных идеях о границах возможности физики как науки. Это верно даже для самого большого его заблуждения — отказа принять квантовую механику как фундаментальную физическую теорию описания природы.

Несмотря на то что Эйнштейн заложил основы квантовой механики своей теорией фотоэффекта (за что позже он получил Нобелевскую премию), он никогда не изменял логике классической физики. Идея о том, что положение частицы подчиняется вероятностным законам или что одна частица может мгновенно повлиять на другую частицу, находящуюся от первой на большом расстоянии, казалась ему абсурдной. Тем не менее взгляды Эйнштейна на парадоксы квантовой механики обладали более интересными нюансами, чем это принято считать (см. в этом номере статью Джорджа Массера «Случаен ли космос?»,

с. 76). Поздние исследования Эйнштейна были посвящены попыткам объединить в классических рамках уравнения общей теории относительности и электромагнетизма — в стремлении приблизиться к тому, что сейчас называют теорией великого объединения или единой теорией поля.

Веда исследования в этом направлении, Эйнштейн был очарован концепцией немецкого математика Теодора Калуцы (Theodor Kaluza) 1921 г., позже развитой шведским физиком Оскаром Клейном (Oskar Klein). Суть заключалась в том, что Вселенная предполагалась пятимерной, содержащей три пространственных измерения, одно временное и пятое, свернутое калачиком компактное измерение, недоступное наблюдениям в силу своей малости. В такой многомерной Вселенной можно было бы единообразно задать гравитационные и электромагнитные силы. Для Эйнштейна одним из привлекательных аспектов новой теории была возможность классического подхода. Клейн показал, что в такой пятимерной модели формальное квантование электрического заряда могло бы быть следствием описания электромагнетизма в геометрии замкнутого кругового пятого измерения.

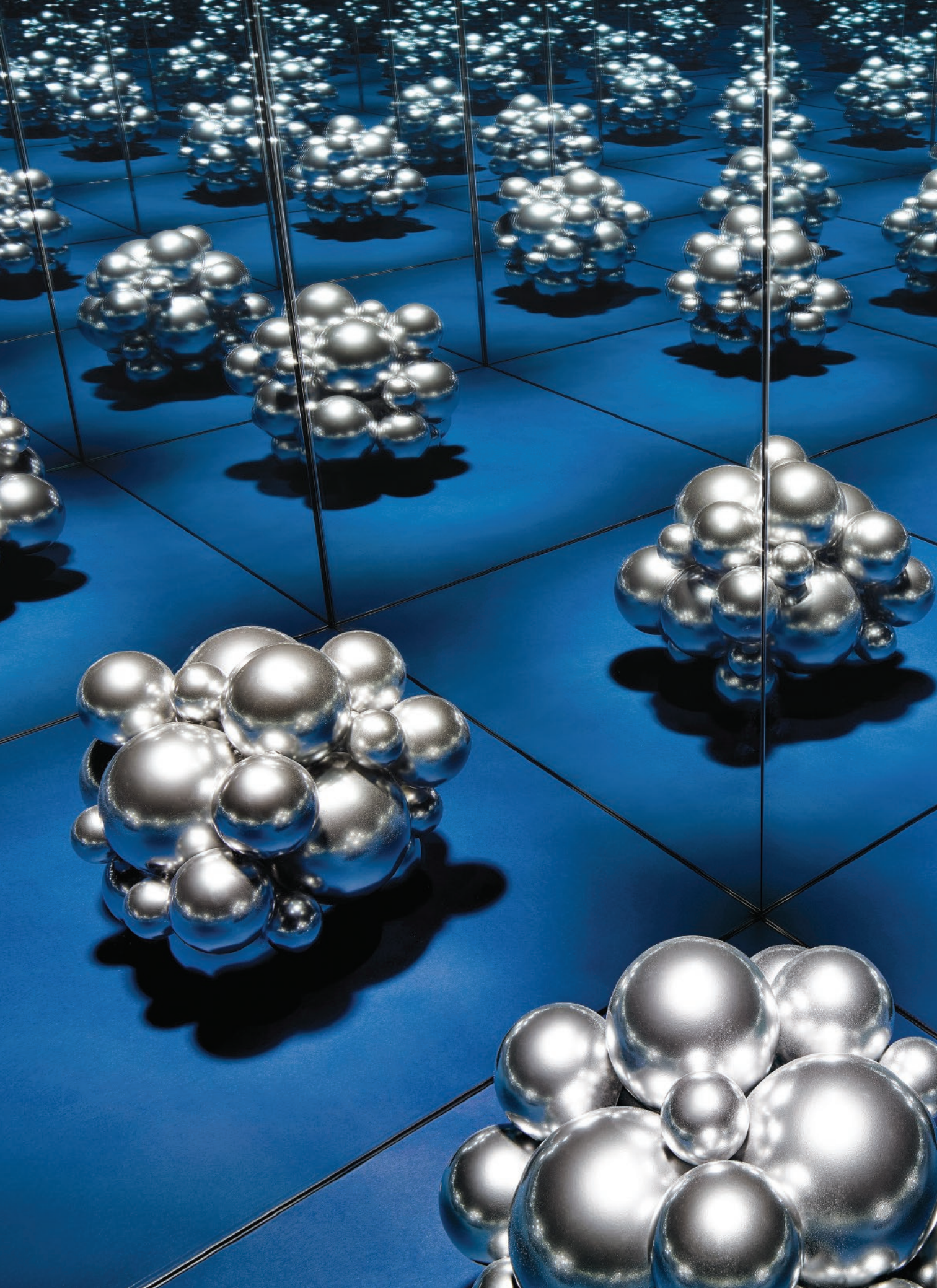
Попытки Эйнштейна создать единую теорию поля не привели к успеху, но его ошибочные предположения завершились в будущем важными научными прорывами. Акцентирование Эйнштейном внимания на пятимерной теории Калуцы и Клейна, возможно, породило многомерные математические модели современной теории суперструн. Последняя предлагает варианты включения квантовой механики в общую теорию относительности. Вполне вероятно, Эйнштейна оттолкнула бы идея того, что общая теория относительности произрастает на квантовом ландшафте, а не наоборот. Однако, как мы увидели, Эйнштейн был кем угодно, но только не непогрешимым. ■

Перевод: О.С. Сажина

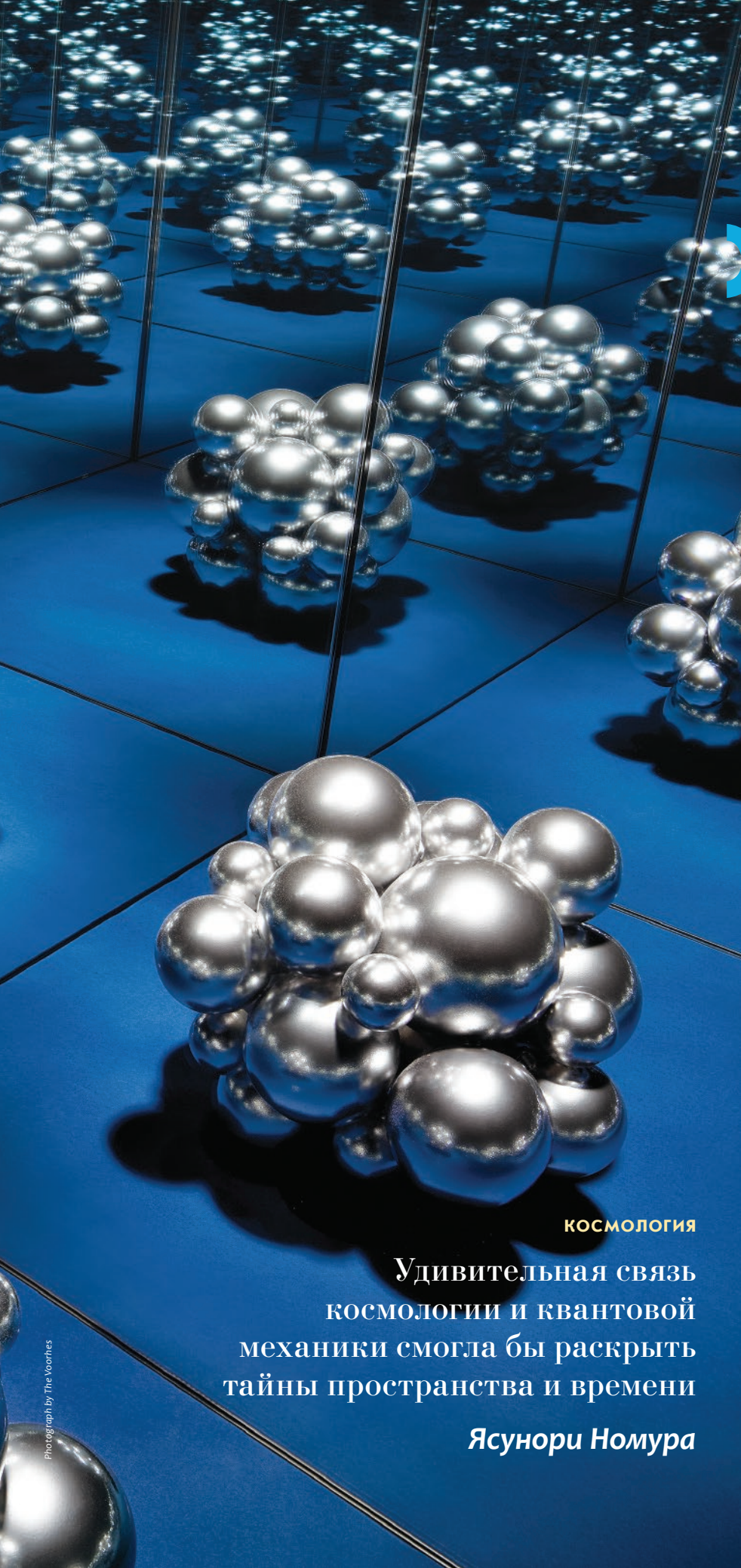
### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Краусс Л., Тернер М. Космическая загадка // ВМН, № 12, 2004.
- Кайзер Д., Кригер А. Как правильно ошибаться? // ВМН, № 8, 2012.
- The Origin of Gravitational Lensing: A Postscript to Einstein's 1936 Science Paper. Jürgen Renn, Tilman Sauer and John Stachel in Science, Vol. 275, pages 184–186; January 10, 1997.
- Einstein versus the Physical Review. Daniel Kennefick in Physics Today, Vol. 58, No. 9, pages 43–48; September 2005.









КОСМОЛОГИЯ

Удивительная связь  
космологии и квантовой  
механики смогла бы раскрыть  
тайны пространства и времени

Ясунори Номура

Photograph by The Vooorks

# КВАНТОВЫЙ МУЛТЫМИР

## ОБ АВТОРЕ

**Ясунори Номура** (Yasunori Nomura) — профессор физики и директор Центра теоретической физики в Калифорнийском университете в Беркли. Сотрудник Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли и руководитель Института физики и математики Вселенной им. Кавли при Токийском университете.



ногие космологи согласны с удивительным выводом о том, что наша Вселенная, которая казалась целым необъятным миром, в действительности может представлять собой всего лишь малую часть гораздо большей структуры, называемой мультимиром. При таком подходе предполагается существование множества отдельных вселенных, в каждой из которых действуют свои собственные физические законы. Так, виды и свойства элементарных частиц могут быть разными в разных вселенных.

Концепция мультимира исходит из предположения наличия инфляционной стадии ранней вселенной, когда наш мир расширялся ускоренно. В подобном процессе одни области могут перестать ускоренно расширяться раньше, чем другие, формируя так называемые пузыри-вселенные, не связанные друг с другом, напоминающие пузырьки в кипящей воде. Наша Вселенная будет таким пузырьком среди бесконечного числа других. Идея о том, что наша Вселенная представляет собой только часть гораздо большей структуры, не так необычна, как кажется на первый взгляд. Видимый мир — это далеко не все, что существует, в чем неоднократно убеждались ученые. С точки зрения теории понятие мультимира с его бесконечным количеством пузырьков-вселенных представляет большую проблему. Дело в том, что эта концепция стирает фундаментальное представление о правдоподобности любой физической теории, которая обязана давать прогнозы. По словам одного из создателей инфляционной теории Алана Гута (Alan

Guth) из Массачусетского технологического института, «вечно расширяющейся вселенной все, что может произойти, произойдет — и произойдет бесконечное число раз». Для одной вселенной, где события происходят ограниченное количество раз, ученые могут вычислить относительную вероятность осуществления какого-то одного события по сравнению с другим. Это можно рассчитать, сравнивая соответствующие количества событий. Однако в мультимире, где происходит все и бесконечное число раз, такие вычисления невозможны, вследствие чего невозможно и судить о том, какое событие более вероятно, а какое менее вероятно. Можно сделать прогноз на любой вкус, и в какой-нибудь вселенной это обязательно случится. Эта информация, по сути, оказывается бесполезной, потому что ничего не скажет о том, что именно случится в нашей конкретной Вселенной.

Такая кажущаяся потеря предсказательной силы теории давно беспокоит физиков. Некоторые исследователи, включая и меня, предполагают, что

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Согласно теории космологической инфляции, по которой ранняя Вселенная расширялась экспоненциально, мы живем не просто во вселенной, но в огромном мультимире.
- Проблема в концепции мультимира заключается в том, что любые события, которые могут произойти, обязательно произойдут, причем бесконечное число раз. Это лишает теорию предсказательной силы.
- Физики считают, что могут решить проблему, иначе взглянув на концепцию мультимира, считая, что он эквивалентен квантово-механическому многолистному миру. В рамках последней концепции наша Вселенная есть одна из сосуществующих вселенных в «вероятностном пространстве», а не в едином реальном пространстве.





*Полученный космическим телескопом «Хаббл» сверхглубокий снимок, на котором показаны галактики, удаленные от нас на расстояния около 13 млрд световых лет. Объекты, находящиеся гораздо дальше, навсегда останутся недостижимыми для нас, потому что расширение пространства заставляет их разбегаться быстрее, чем скорость света. Таким образом, формируется так называемый космологический горизонт, который имеет важные приложения для теории мультивира.*

указать путь к решению этой проблемы поможет квантовая теория. Квантовая теория, в отличие от теории мультивира, оперирует крошечными частицами. По иронии судьбы бесконечно большое сможет найти описание с помощью малого. В частности, космологическая картина вечно расширяющегося по закону экспоненты мультивира с точки зрения математического описания может быть эквивалентна многолистной интерпретации квантовой механики. Последняя пытается дать объяснение, каким образом частицы могут находиться во многих местах одновременно. Как мы увидим в дальнейшем, такая связь между теориями не только решает проблему прогнозирования, но и помогает выявить неожиданные свойства пространства и времени.

### Россыпь квантовых миров

Мы придем к идее взаимного соответствия двух теорий после того, как пересмотрим принципы многолистной интерпретации квантовой механики. Эта концепция возникла для прояснения некоторых странных особенностей квантовой физики. В квантовом мире причина и следствие проявляют себя иначе, чем в макромире, и результат любого процесса всегда имеет вероятностный характер.

В макроскопическом эксперименте мы всегда можем точно предсказать, где приземлится мяч, если знаем его начальное положение, скорость и другие параметры. В случае же квантового мяча мы можем только сказать, что есть некоторая вероятность обнаружить его здесь или там. Вероятностной природы нельзя избежать, узнавая больше о параметрах мяча, о воздушных потоках или других деталях, — это внутреннее свойство любой квантовой системы. Один и тот же мяч, брошенный при одних и тех же условиях, иногда приземлится в точке *A*, а иногда в точке *B*. Такой вывод может показаться странным, но законы квантовой механики подтверждаются в огромном числе экспериментов и действительно описывают, как природа работает на уровне субатомных сил и частиц. В квантовом мире мы скажем, что после того как мяч брошен, но прежде чем упал, он находится в так называемой суперпозиции двух состояний *A* и *B*. Другими словами, мяч не находится ни в точке *A*, ни в точке *B*, но в некоем вероятностном облаке обеих точек (и во многих других точках тоже). Тем не менее стоит нам посмотреть и обнаружить мяч в определенном месте (например, в точке *A*) — и любой другой, кто также следит за судьбой этого мяча, тоже подтвердит, что

СОВМЕЩАЯ ДВЕ ТЕОРИИ

# Инфляция встречает множество миров

Согласно теории инфляции, наша Вселенная — одна из бесконечно многих, которые образовались при экспоненциальном расширении раннего космоса. Однако такая картина мультимира может нарушить предсказательную способность теории, потому что все, что может произойти в бесконечном мультимире, произойдет бесконечное количество раз. Проблема решаема в том случае, если инфляционный мультимир эквивалентен многомировой интерпретации квантовой механики, согласно которой весь этот бесконечный набор вселенных сосуществует не в едином реальном пространстве, а в «вероятностном пространстве».

## Инфляционный мультимир

Согласно инфляционной теории, во время процесса экспоненциального расширения мультимира какие-то области замедляют расширение, формируя пузыри, которые становятся независимыми вселенными. С течением времени все большее количество областей замедляют расширение и количество пузырей-вселенных по мере экспоненциально и вечно растущего пространства увеличивается. Наша Вселенная — всего лишь один из таких пузырей.

Пузыри-вселенные  
Вечно и экспоненциально расширяющееся пространство

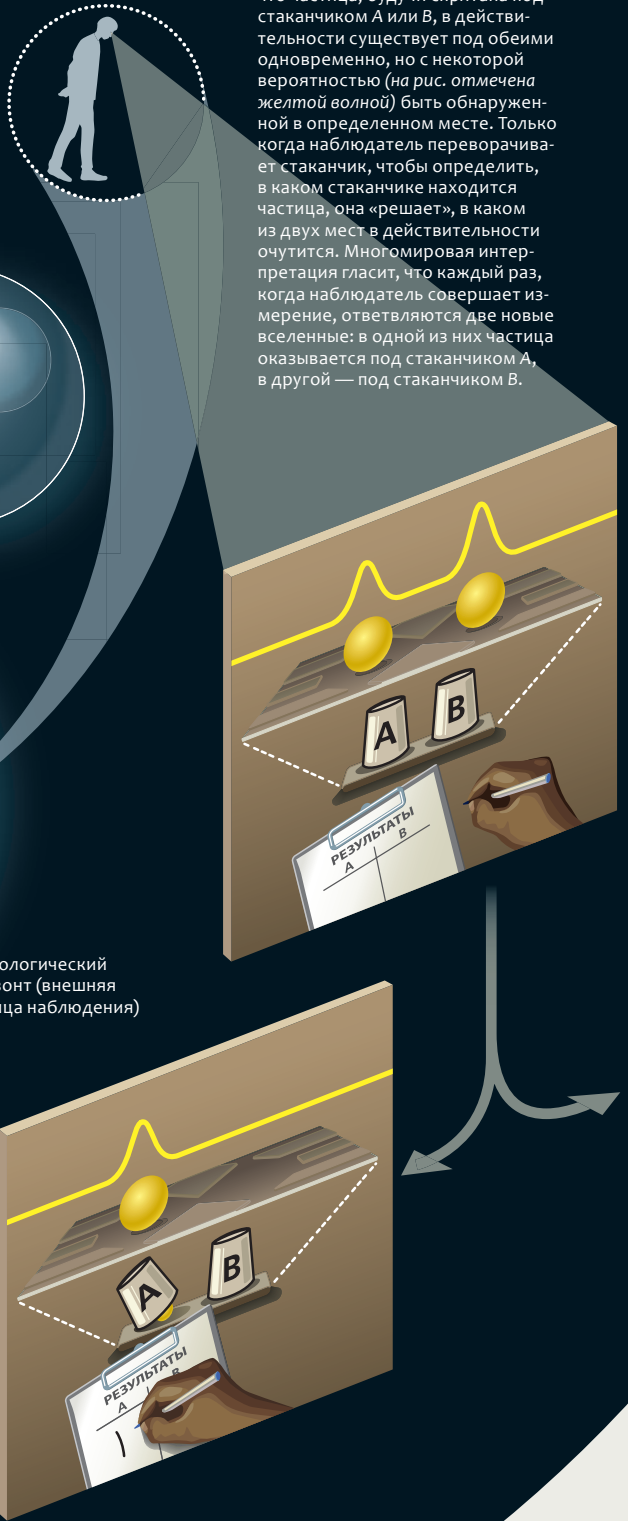
Наблюдатель

Космологический горизонт (внешняя граница наблюдения)

Диаграмма крайне упрощена для наглядности. В теории мультимира внутри одних пузырей могут возникать другие пузыри.

## Множество миров

Квантовая механика утверждает, что частица, будучи спрятана под стаканчиком А или В, в действительности существует под обоими одновременно, но с некоторой вероятностью (на рис. отмечена желтой волной) быть обнаруженной в определенном месте. Только когда наблюдатель переворачивает стаканчик, чтобы определить, в каком стаканчике находится частица, она «решает», в каком из двух мест в действительности осядет. Многомировая интерпретация гласит, что каждый раз, когда наблюдатель совершает измерение, отщепляются две новые вселенные: в одной из них частица оказывается под стаканчиком А, в другой — под стаканчиком В.





Суперпозиция состояний: много пузырей-вселенных существуют одновременно

↑ космологическая история ↓

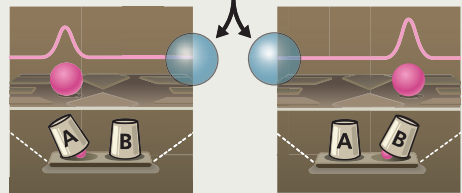
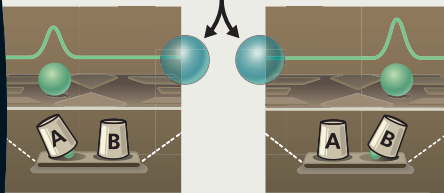
**Большое встречается малое**

Инфляционный мультимир может быть тем же самым, что и многомировая интерпретация квантовой механики, если образование новых пузырей-вселенных — это просто пример квантово-механического ветвления, как это виделось бы гипотетическому наблюдателю. Формирование нового пузыря эквивалентно получению определенного результата наблюдения. При таком подходе теория становится способной давать прогнозы, потому что бесконечное количество пузырей-вселенных сосуществуют вероятно, а не в реальном пространстве. Таким образом, наблюдатель в расширяющемся мультимире сможет делать прогнозы, основанные на вероятностях того или иного события. Возможность прогнозирования — это требование любой научной теории, претендующей на реалистичное описание мира.

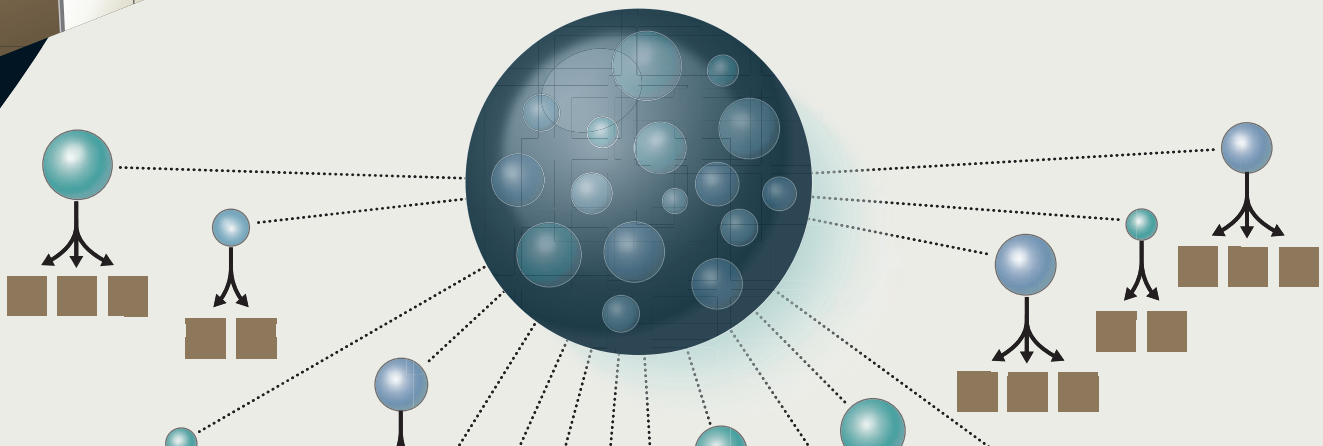
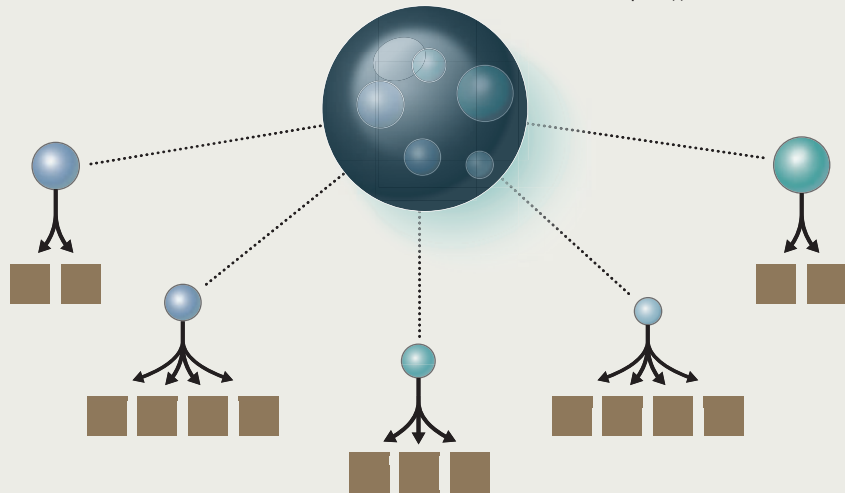
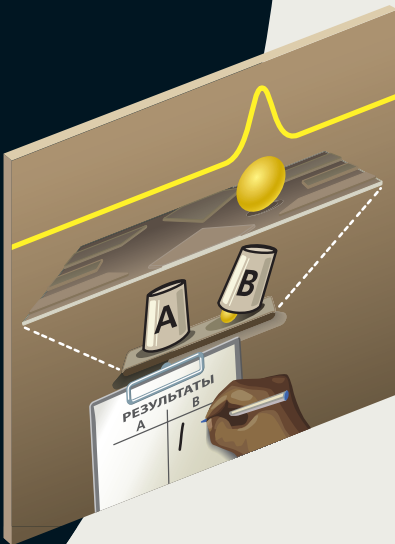
Вселенная А

Вселенная В

Вселенная С



Разные возможные исходы эксперимента, проведенного во вселенной С



мяч находится именно в точке *A*. Другими словами, прежде чем произведено наблюдение квантового состояния, его исход не определен, но после наблюдения все последующие измерения покажут точно такой же результат, как и первое. В общепринятом понимании квантовой механики, называемом копенгагенской интерпретацией, ученые говорят, что первое наблюдение изменяет состояние системы из состояния суперпозиции к определенному состоянию *A*. Хотя копенгагенская интерпретация может давать прогнозы для результатов измерения, она приводит к серьезным трудностям на концептуальном уровне. Что в действительности означает понятие «измерение» и почему оно может изменять состояние системы от суперпозиции возможно-стей к единственной определенности? Происходит ли такая смена состояний, если за системой наблюдает, например, собака или муха? Как быть, если молекула воздуха взаимодействует с системой на протяжении всего времени, пока мы ожидаем результата, и как она может повлиять на этот результат? Есть ли какой-то особый физический смысл в процедуре наблюдения системы человеком?

В 1957 г. Хью Эверетт (Hugh Everett), ставший аспирантом Принстонского университета, разработал многомировую интерпретацию квантовой механики, которая прекрасно разрешила вышеупомянутые проблемы, — хотя первоначально многие приняли теорию с насмешкой и она до сих пор менее популярна, чем копенгагенская интерпретация. Ключевая идея Эверетта заключалась в том, что состояние квантовой системы отражает состояние всего мира вокруг него, то есть мы должны включать наблюдателя в полное описание измерения. Наблюдатель выступает как часть измерения. Другими словами, мы не можем считать мяч, ветер и бросающую мяч руку существующими отдельно. Мы должны включить в фундаментальное описание системы также и человека, который наблюдает точку приземления мяча, и все остальное, происходящее в мире. В такой картине квантовое состояние системы после измерения все еще представляет собой суперпозицию состояний — суперпозицию не просто состояний мяча в двух точках, но двух огромных миров! В первом мире наблюдатель считает, что состояние системы изменилось и стало *A*, следовательно, любой наблюдатель в этом мире также получит как результат

состояние *A* во всех последующих измерениях. Как только измерение было произведено, второй мир «откалывается» от первого. Во втором мире наблюдатель обнаружил, что мяч приземлился в точке *B*. Такая модель объясняет, почему наблюдатель (скажем, человек) думает, что его наблюдения изменили состояние системы. На самом деле произошло следующее: когда человек производил измерение (взаимодействовал с системой), он сам разделился на двух разных людей, которые живут в двух различных параллельных мирах, соответствующих двум различным исходам *A* и *B*.

Согласно такой картине, проводимые людьми измерения не имеют особого значения. Состояние мира непрерывно разветвляется на множе-

ство возможных параллельных миров, которые сосуществуют в суперпозиции. Человек-наблюдатель, будучи частью мира, не может выпасть из этого процесса — наблюдатель расщепляется на множество наблюдателей, живущих во множестве

параллельных миров, которые все одинаково реальны. Очевидным, но важнейшим следствием такой картины становится то, что все в природе подчиняется законам квантовой механики — как малое, так и большое.

Какое же отношение имеют интерпретация квантовой механики Эверетта и параллельные реальности к существующему в непрерывном реальном пространстве мультимиру, который обсуждался в начале? В 2011 г. я утверждал, что вечно расширяющийся мультимир и квантово-механическая многомировая модель Эверетта — в определенном смысле одинаковые понятия. При таком подходе бесконечно большое пространство, возникающее из-за «вечной» инфляции, есть своего рода иллюзия. Множество расширяющихся пузырей-вселенных не существуют в едином реальном пространстве, а представляют собой возможные ветви вероятностного дерева.

Примерно в то же время Рафаэль Буссо (Raphael Bousso) из Калифорнийского университета в Беркли и Леонард Сасскинд (Leonard Susskind) из Стэнфордского университета предложили аналогичную идею. Если это так, то многомировая интерпретация мультимира означала бы, что законы квантовой механики не только действуют в микроскопических областях, но также играют ключевую роль в определении глобальной структуры мультимира даже на сверхбольших расстояниях.

## **Автор статьи и другие физики тоже продолжают заниматься идеей квантового мультимира. Как можно определить квантовое состояние всего мультимира? Что есть время и как оно появляется?**

### Затруднительное положение черной дыры

Для того чтобы лучше объяснить, как многомировая интерпретация квантовой механики могла бы описывать инфляционный мультимир, нужно вкратце поговорить о черных дырах. Черная дыра — это экстремально сжатая область пространства-времени, чье мощнейшее гравитационное поле не дает уйти никаким объектам, начавшим в нее падать. Таким образом, черные дыры — идеальный полигон для тестирования физических процессов с сильными квантовыми и гравитационными эффектами. В частности, рассмотренный ниже мысленный эксперимент с участием черных дыр показывает грань, где традиционное представление о мультимире уходит с привычной колеи, делая любые предсказания невозможными. Предположим, что мы бросаем в черную дыру книгу и ведем наблюдение за происходящим со стороны. Согласно теории, в то время как сама книга не сможет избежать попадания в черную дыру, содержащаяся в ней информация не будет утрачена. По моему мнению, после того как книга будет уничтожена гравитацией черной дыры и после того как сама черная дыра постепенно испарится, испуская слабое излучение (эффект, известный как механизм Хокинга, теоретически предсказываемый Стивеном Хокингом из Кембриджского университета), внешний наблюдатель сможет воссоздать информацию, исследовав испущенное черной дырой излучение. Даже прежде чем черная дыра испарится полностью, информация, содержащаяся в книге, начнет постепенно просачиваться наружу вместе с излучением Хокинга.

Еще одна странность возникает, если рассматривать ситуацию с точки зрения наблюдателя, падающего в черную дыру вместе с книгой. В этом случае книга просто проходит горизонт событий черной дыры и навсегда остается внутри нее. Таким образом, для зачитавшегося наблюдателя информация, содержащаяся в книге, тоже окажется навсегда упавшей в черную дыру. С другой стороны, только что утверждалось, что с точки зрения внешнего наблюдателя информация все-таки выйдет наружу. Какое же из этих двух рассуждений верно?

Можно предположить, что информация дублируется: один «экземпляр» остается внутри черной дыры, а другой уходит наружу вместе с излучением Хокинга. Однако такое решение невозможно. В квантовой механике так называемая теорема о запрете клонирования запрещает точное и полное копирование информации. Таким образом, похоже, что выводы обоих наблюдателей не могут быть верными одновременно. Физик Герард 'т Хоофт (Gerard 't Hooft) из Утрехтского университета и Сасскинд со своими коллегами предложили следующее решение. Обе точки

зрения могут быть правильными, но не одновременно. Так, если вы удаленный наблюдатель, то для вас информация находится снаружи. Нет нужды описывать внутреннюю часть черной дыры, потому что вы никогда не сможете ее достичь. Фактически, чтобы избежать клонирования информации, вы должны считать внутреннюю часть черной дыры несуществующей. С другой стороны, если вы наблюдатель, падающий в черную дыру, то внутренность черной дыры становится единственно доступным вам миром, который содержит и книгу, и информацию в ней. Однако такая картина возможна только в модели, игнорирующей излучение Хокинга, что, в принципе, оправданно, поскольку вы, пройдя горизонт событий, оказываетесь в ловушке, отрезав себя от излучения, испущенного с границы черной дыры. Нет никакого противоречия в соединении обеих точек зрения, но только если искусственно их «подправить», что вы никогда не смогли бы сделать физически, учитывая, что нельзя быть одновременно и далеким, и падающим наблюдателем.

### Космологический горизонт

Эта загадка черной дыры кажется не связанной с задачей о том, что общего может быть у многомировой концепции квантовой механики и у мультимира. Тем не менее получается, что граница черной дыры в значительной степени аналогична так называемому космологическому горизонту. Этот горизонт представляет собой границу области пространства-времени, внутри которой мы можем получать сигналы из глубокого космоса. Горизонт существует потому, что пространство расширяется экспоненциально и свет от объектов, находящихся дальше этой невидимой границы, не успевает достичь нас. Так, любое послание от этих объектов никогда не сможет до нас дойти. Таким образом, ситуация отчасти сродни черной дыре с точки зрения удаленного наблюдателя: так же как и в случае черной дыры, квантовая механика требует, чтобы наблюдатель, находящийся внутри космологического горизонта, считал пространство-время по другую сторону от границы (то есть снаружи космологического горизонта) несуществующим. Если мы рассмотрим такое пространство-время в дополнение к информации о том, что может быть получено от горизонта позже (аналог излучения Хокинга в случае черной дыры), то получим избыток информации. Другими словами, любое описание квантового состояния вселенной должно содержать только одну область, заключенную внутри космологического горизонта. В частности, не может быть бесконечного пространства в любом однозначном и полном описании всего космоса.

Если квантовое состояние отражает только область внутри горизонта, тогда же тогда мультимир, который, как мы ожидаем, существует во внешнем, экспоненциально расширяющемся пространстве? Ответ заключается в том, что создание пузырей-вселенных вероятно, подобно всем другим процессам в квантовой механике. Точно так же как квантовое измерение может давать множество различных результатов, различающихся своими вероятностями, в инфляционной модели может породиться множество различных вселенных, каждая из которых обладает своей вероятностью рождения. Другими словами, квантовое состояние, представляющее вечно расширяющееся пространство, есть суперпозиция миров — или ветвей. Каждый мир — это отдельная вселенная; каждая из ветвей включает в себя только одну область со своим космологическим горизонтом.

Поскольку каждая из этих вселенных конечна, удастся избежать проблемы предсказуемости, возникающей в бесконечно большом пространстве, в котором может произойти все что угодно. Множественные вселенные в этом случае не все существуют одновременно в реальном пространстве. Они сосуществуют только в вероятностном пространстве, то есть только как возможные результаты наблюдений, проведенных людьми, живущими в каждом из этих миров. Таким образом, каждая вселенная — каждый возможный исход наблюдения — сохраняет свою вероятность образования.

Описанная картина объединяет вечно расширяющийся космологический мультимир и многомировую концепцию Эверетта. Космологическая история разворачивается так. Мультимир начинается из некоторого исходного состояния и развивается в суперпозицию множества пузырей-вселенных. С течением времени состояния, представляющие каждый из этих пузырей, в свою очередь разветвляются на суперпозиции новых состояний, представляющих разные возможные исходы экспериментов. Эксперименты не обязательно научные, это могут быть любые физические эксперименты, проводимые в рамках своей вселенной. В конечном итоге состояние, представляющее целый мультимир, будет состоять из огромного количества ветвей, каждая из которых — это возможный мир, возникающий из начального состояния. Квантово-механические вероятности, таким образом, определяют космологические макропроцессы. Мультимир и многомировой квантовый мир, возможно, описывают одно и то же явление — суперпозицию на различных шкалах. В таком новом представлении наша Вселенная — всего лишь один из всевозможных миров, управляемых фундаментальными принципами квантовой физики и существующих одновременно в вероятностном пространстве.

## Мир за пределами

Для понимания правильности представленной здесь идеи хорошо бы проверить ее в эксперименте. Но разве это возможно? Оказывается, открытие одного феномена может оказать поддержку новому научному мировоззрению. Существование мультимира может проявляться в наличии небольшой отрицательной кривизны пространства нашей Вселенной. Другими словами, объекты и световые лучи будут двигаться не по прямым линиям, как это происходит в евклидовом пространстве, а вдоль кривых, даже при полном отсутствии гравитационных полей. Такая кривизна может образоваться из-за того, что даже несмотря на конечность пузыря-вселенной с точки зрения всего мультимира, находящийся внутри данного конкретного пузыря наблюдатель будет воспринимать свою вселенную как бесконечно большую, что и будет проявляться как видимость отрицательной кривизны. Примером поверхности с отрицательной кривизной может служить поверхность седла, в то время как поверхность шара — сфера — обладает положительной кривизной. Если бы наблюдатель был внутри такого пузыря, то пространство казалось бы ему загибающимся. Современные наблюдения пока подтверждают, что наша Вселенная плоская (*евклидова*. — *Примеч. пер.*). Новые наблюдения, исследующие траектории очень далеких световых лучей, в ближайшие десятилетия смогут улучшить точность определения меры кривизны Вселенной примерно на два порядка. Если в ходе этих наблюдений будет обнаружено некоторое количество отрицательной кривизны, это сможет поддержать концепцию мультимира.

Несмотря на то что наличие отрицательной кривизны в принципе возможно и в одиночной вселенной, это, на мой взгляд, менее правдоподобно. В частности, открытие отрицательной кривизны поддержит картину квантовой вселенной, о которой шла речь в этой статье, поскольку такая модель может привести к достаточно большой кривизне — настолько большой, чтобы быть обнаруженной, в то время как в традиционных инфляционных моделях подобная кривизна оказалась бы на несколько порядков ниже той, что мы надеемся наблюдать. Интересно, что открытие положительной кривизны сможет фальсифицировать гипотезу мультимира, потому что в инфляционных моделях предполагается, что пузыри-вселенные могут производить только отрицательную кривизну. С другой стороны, если нам повезет, мы даже сможем увидеть некие драматические знаки мультимира — такие как последствия столкновений отдельных пузырей-вселенных, которые формируют единую ветвь квантового мультимира. Однако ученые не убеждены, что когда-нибудь мы сможем наблюдать такие сигналы.



Я и другие физики продолжаем разрабатывать идею квантового мультимира на теоретическом уровне. Можно задавать, например, такие фундаментальные вопросы: как мы можем определить квантовое состояние всего мультимира или что такое время и как оно возникает? Картина квантового мультимира не дает на эти вопросы немедленных ответов, но предоставляет основу для их решения. Так, недавно я обнаружил, что ограничения, накладываемые математическим требованием о том, что теория должна включать строго определенные вероятности, приводят к возможности однозначного определения квантового состояния всего мультимира. Эти ограничения предполагают также, что в целом квантовое состояние мультимира не изменяется, даже если физический наблюдатель, представляющий собой часть состояния мультимира, обнаружит, что постоянно формируются новые пузыри-вселенные. Это означает, что наше восприятие Вселенной меняется со временем и, действительно, концепция времени сама по себе может оказаться иллюзорной. Время, согласно такому представлению, есть «возникающая концепция», появляющаяся как следствие более фундаментальной реальности и существующая, возможно, только в локальных ветвях мультимира. Многие из обсуждаемых здесь идей до сих

пор чисто умозрительны, но интересно то, что физики в состоянии поднимать такие большие фундаментальные вопросы, основываясь на успехах теоретических изысканий. Кто знает, куда приведут нас эти исследования? Очевидно то, что мы живем в интереснейшую эпоху, когда наши научные исследования начинают выходить за рамки того, что мы полагали нашим физическим миром, — нашей Вселенной — и двигаться вперед, в потенциально безграничное царство. ■

**Перевод: О.С. Сажина**

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Берн П. Множественность миров Хью Эверетта // ВМН, № 3, 2008.
- Physical Theories, Eternal Inflation, and the Quantum Universe. Yasunori Nomura in Journal of High Energy Physics, Vol. 2011, No. 11, Article No. 063; November 2011. Препринт доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1104.2324>
- Multiverse Interpretation of Quantum Mechanics. Raphael Bousso and Leonard Susskind in Physical Review D, Vol. 85, No. 4, Article No. 045007. Опубликовано онлайн 06.02.2012. February Препринт доступен по адресу: <https://arxiv.org/abs/1105.3796>



*Выходит 6 раз в год*

*Познавательный журнал для хороших людей*

Академик Н. Л. Добрецов:  
«В Сибирь поехали те известные ученые, которым было тесно в столицах, кто искал новые возможности для реализации своих идей»

Академик А. Н. Скринский:  
«...За создание ускорителя на встречных пучках взялся десяток лабораторий по всему миру, но к финишу пришли только наш ИЯФ и Стэнфордский университет»

Академик Г. Н. Кулипанов:  
«Традиционные круглые столы ИЯФ собирали не только ученых, но и писателей, артистов, режиссеров, поэтов. Это был символ демократии, независимых суждений за чашечкой кофе»

Доктор химических наук А. К. Петров:  
«В эти самые лучшие наши годы мы могли подойти к любому академику или профессору, задать вопрос и получить ответ. Это была бесценная школа не только науки, но и этики, и самого бытия»

**www.scfh.ru**

Новое грандиозное путешествие по всем известным масштабам реальности показывает внешние пределы существования от края наблюдаемой Вселенной до субатомного мира

Калеб Шарф

КОСМОЛОГИЯ

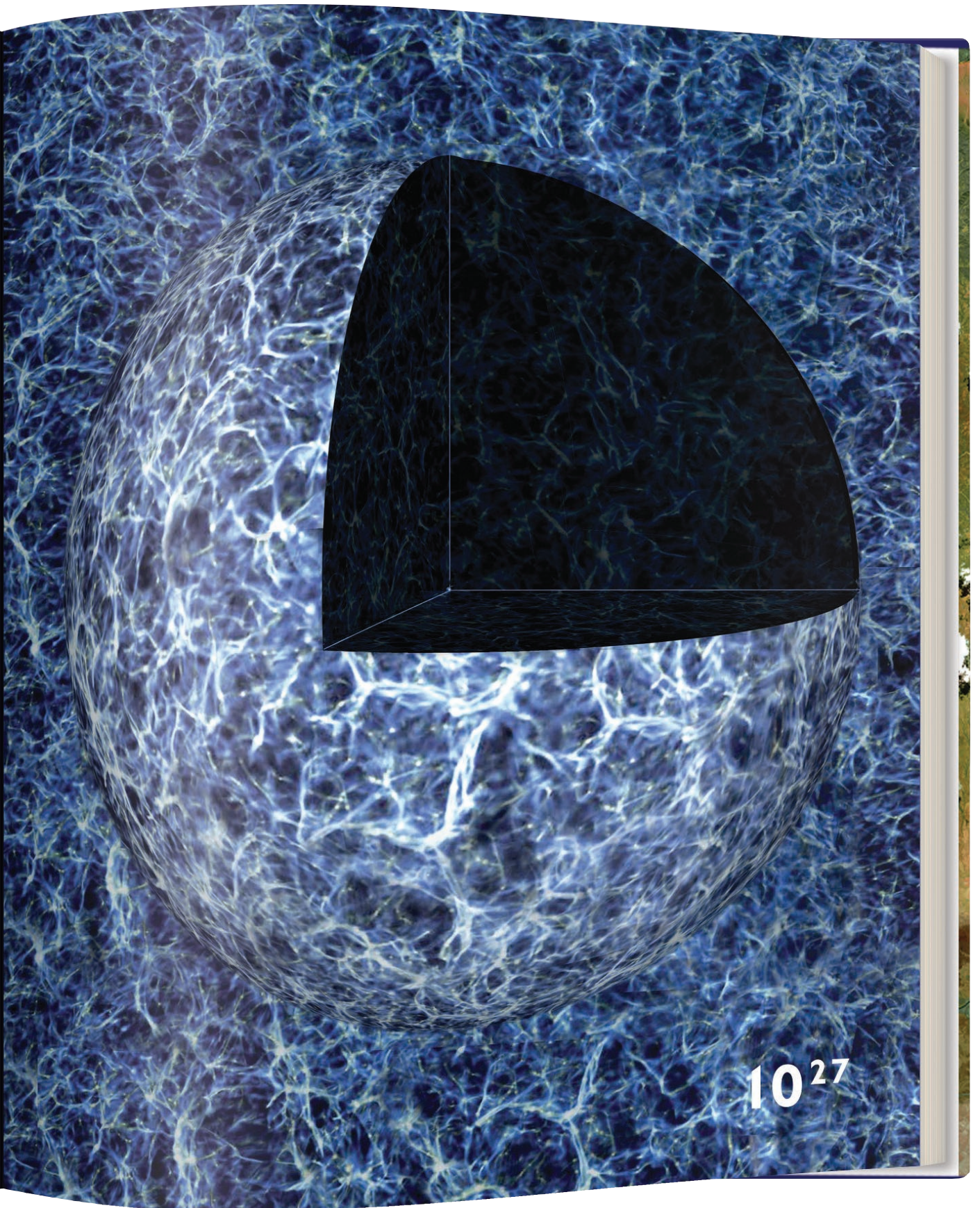
# МАСШТАБИРУЕМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

**Х**отите ли вы услышать самую грандиозную историю на свете? Давным-давно атомы вашего тела были рассыпаны на триллионы километров пустого пространства. Миллиарды лет назад не было и намека на то, что эти атомы в конечном итоге составят ваши глаза, кожу, волосы, кости и 86 млрд нейронов вашего мозга. Многие из этих атомов родились в глубинах звезд — возможно, и нескольких звезд, разделенных триллионами и триллионами километров. Взорвавшись, звезды сбросили оболочки, их части разлетелись прочь в потоках раскаленного газа. Этот газ — всего лишь малая часть галактики, одной среди сотен миллиардов других, распротертых посреди невероятно огромных космических пустот размерами триллион триллионов километров.

Адаптированный отрывок из книги Калеба Шарфа «Масштабируемая Вселенная: грандиозное путешествие по космологическим масштабам от почти всего к почти ничему» (The Zoomable Universe: An Epic Tour Through Cosmic Scale, from Almost Everything to Nearly Nothing), печатается с разрешения издательского дома Scientific American / Farrar, Straus and Giroux (США), Atlantic Books (Великобритания) и издательской компании Cheers (Китай). © Калеб Шарф, 2017 г.  
© Рон Миллер (иллюстрации), 2017 г.

Некоторые атомы побывали в оболочке трилобита, возможно, тысяч трилобитов. И с тех пор они меняли пристанище: щупальца, корни, ноги, крылья, кровь и триллионы, тысячи триллионов бактерий на «пересадочных станциях». Одни атомы плавали в глазах существ, глядевших на мир 100 млн лет назад. Другие укрылись в желтках яиц динозавров или застыли в последнем выдохе какого-нибудь существа из глубин ледникового периода. А для некоторых из них вы — это новоселье в живом организме, свершившееся спустя эпохи дрейфа





*Наша наблюдаемая Вселенная* заполняет сферу поперечных размеров около 93 млрд световых лет или около  $10^{27}$  м, Земля находится в центре этой сферы



по океанам и облакам в виде частички триллионов дождевых капель или миллиарда снежинок. Одним словом, наконец все атомы собрались вместе, чтобы сделать вас.

Каждый атом сам по себе обладает структурой размером одну десятую миллиардной части метра в поперечнике. Такая структура балансирует

на грани воспринимаемой нами классической реальности и квантового мира, это нижняя грань Вселенной. Электронные облака занимают большую часть пустого пространства атома. Протоны и нейтроны сосредоточены в ядре, размеры которого в 100 тыс. раз меньше самого атома, и сами — тоже составные частицы из более крохотных

**ОБ АВТОРАХ**

**Рон Миллер** (Ron Miller) — иллюстратор, неоднократно удостоенный наград, а также автор статей в журналах *Scientific American*, *National Geographic* и *Smithsonian*. Иллюстрировал книги Жюль Верна «20 тыс. лье под водой» и «Путешествие к центру Земли». Живет в Виргинии.



**Калеб Шарф** (Caleb Scharf) — директор Колумбийского центра астробиологии, автор книг «Гравитационный двигатель» (*Gravity's Engines*, 2012) и «Комплекс Коперника» (*The Copernicus Complex*, 2014). Живет в Нью-Йорке с женой и двумя дочерьми.

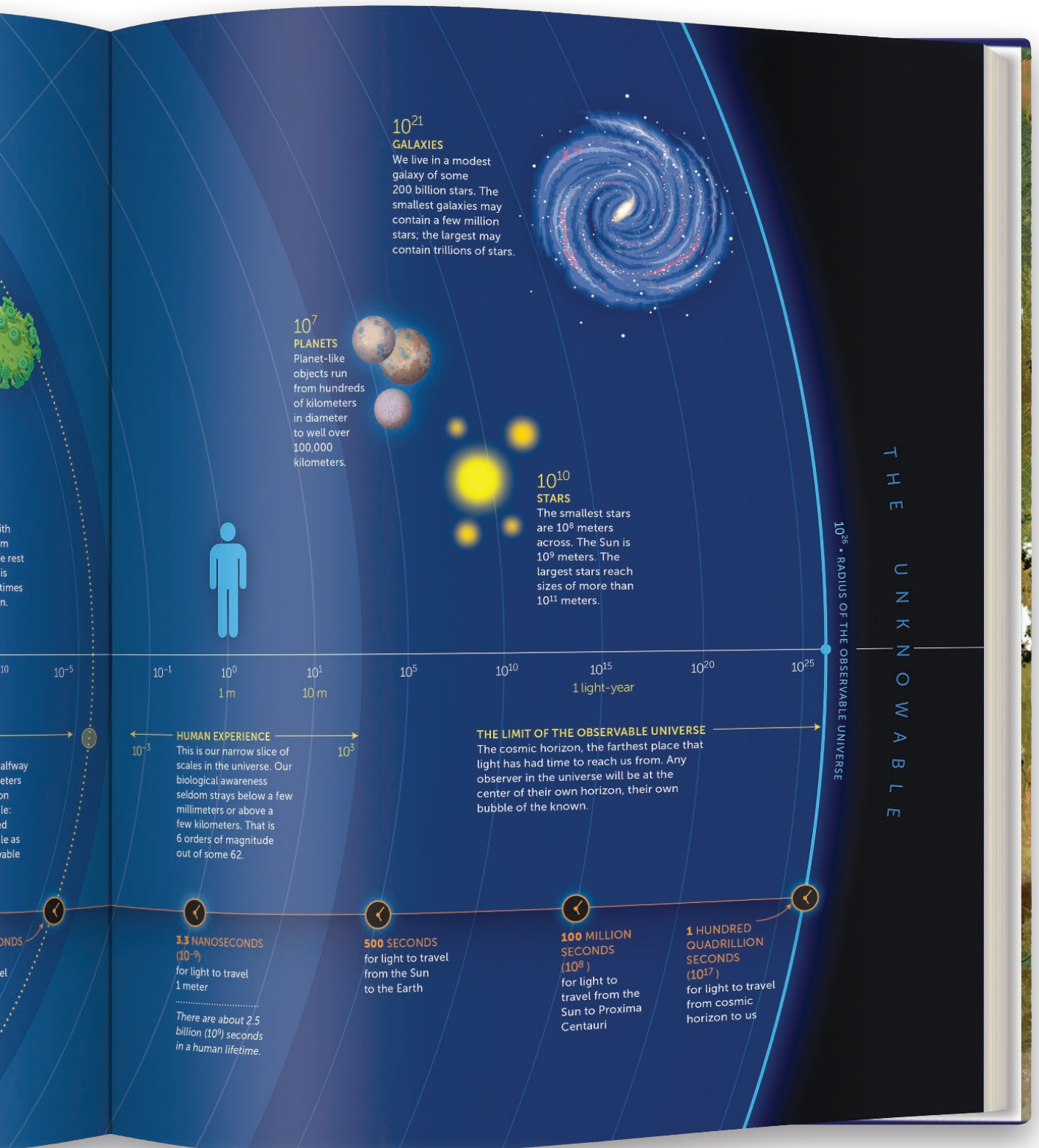


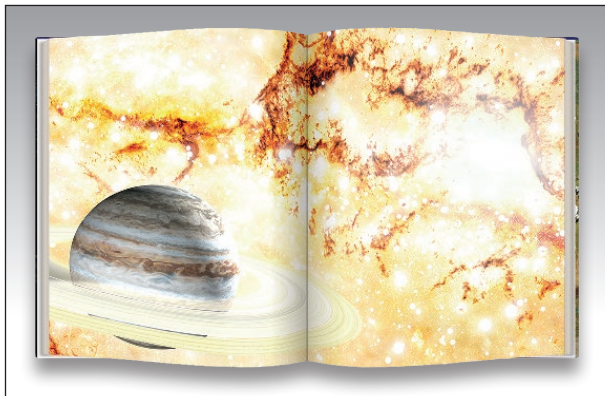
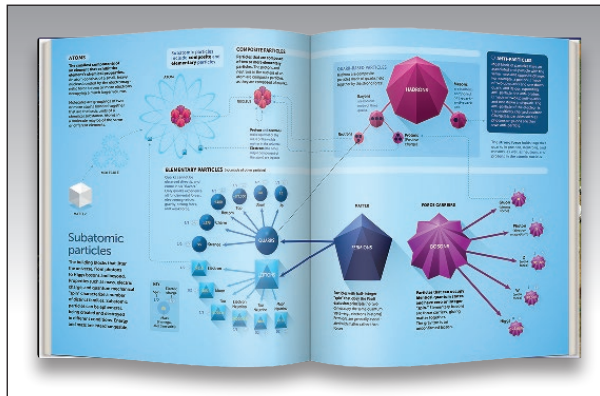


кварков и глюонов. Электрон не обладает конкретным размером, но его можно считать в 10 млн раз меньше размера ядра.

Если сложить все известное вещество, получится около  $10^{80}$  частиц, таких как протоны, нейтроны, электроны и другие субатомные элементы в известной нам Вселенной. Это очень большое число,

но на самом деле это песчинка в море по сравнению с количеством заполняющих Вселенную фотонов. Последних больше в 1 млрд раз. Более того, все эти частицы вместе взятые дают едва ли 5% от общего количества вещества и энергии во Вселенной. Астрономические данные свидетельствуют о том, что существует невидимое теневое





царство таинственных субатомных частиц и фундаментальных сил, которые и составляют большую часть Вселенной — это так называемые темная материя и темная энергия.

Однажды 13,8 млрд лет назад все вышеперечисленное — и видимое, и невидимое — было втиснуто в гораздо меньший объем пространства-времени, обладавший сверхвысокой энергией. Мы и все те, кто могут где-то существовать на расстояниях в 1 млрд световых лет от нас, до сих пор находимся внутри этой области. Даже сейчас мы не разъединены полностью, что, конечно, звучит как выдумка. Наше понимание Вселенной и этапов ее развития вообще напоминает фантастическую историю. Для того чтобы проверить и показать, что мы в действительности знаем (и что мы не знаем) обо всей природе, мы обратимся к следующему хорошо проверенному методу. Совершим путешествие по Вселенной, десятикратно увеличивая масштаб, следуя от края наблюдаемого космоса до глубоких структур реальности. От простого к сложному, от счета пальцев на руках до высшей математики и точнейших измерений, мы сможем все понять, используя идею масштабирования мира, то есть увеличивая или уменьшая масштаб в десять раз. Увязывая эти меняющиеся шкалы вместе в трех пространственных измерениях с тем, что мы называем временем, мы обретаем новый язык для выражения неразрывности явлений и связей в природе, которые простираются далеко

у космического горизонта.

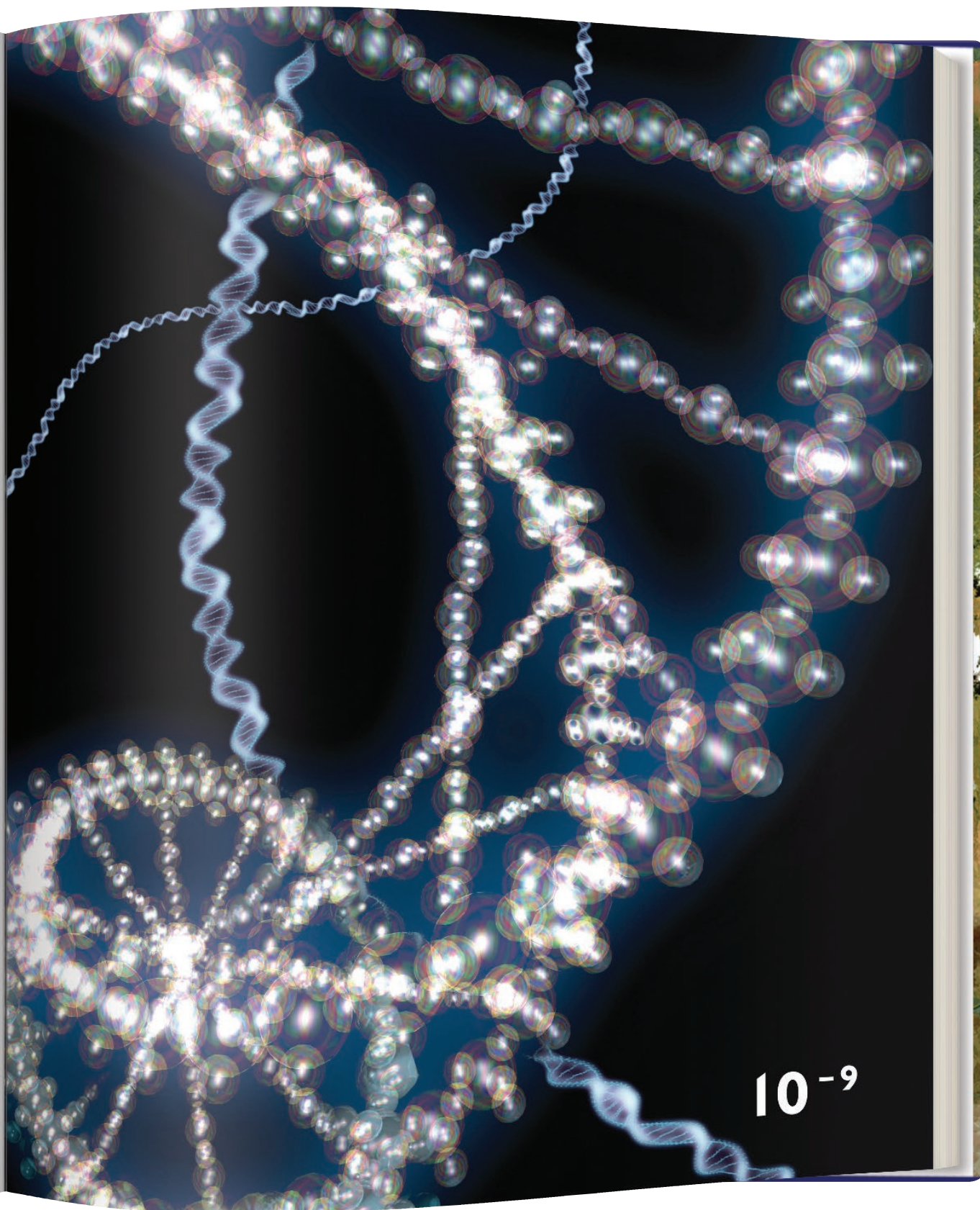
Это путешествие через все известные масштабы реальности, по сути, охватывает все, что существует в природе. Вы могли бы спросить: а что же дальше? Что там, за той сущностью, которую мы называем Вселенной? Что может оказаться «снаружи» нашей наблюдаемой реальности, нашей освещенной солнцем комнатки, полной пылинок, играющих в лучах света? Это фундаментальные

за пределы нашего обычного опыта. Выбранный масштабный коэффициент 10 позволяет последовательно получить увеличение от «почти всего» до «почти ничего».

Разумеется, такой масштабируемый взгляд не сможет точно зафиксировать каждый из наполняющих Вселенную элементов и выявить каждую деталь ее истории. Мы получаем набор своего рода путевых точек по всем физическим масштабам Вселенной на протяжении 62 порядков, от квантовых кирпичиков субатомного мира до областей, в которых целые планеты выглядят всего лишь искорками посреди космических просторов и где целые галактики представляются переливчатым роем

**Порог между областями известного и неизвестного — это космологический горизонт событий, размер которого устанавливается светом, летящим к нам из ранней Вселенной. Внутри горизонта — наша наблюдаемая Вселенная, а сразу за ним — таинственный лабиринт**





**Кирпичики жизни:** на шкалах нанометров ( $10^{-9}$  м) молекула ДНК сворачивается в клеточном ядре

вопросы, и ответ на них может быть таким: все, что в данный момент находится вне Вселенной, в буквальном смысле слова «не Вселенная». Порог между областями известного и неизвестного — это космологический горизонт событий, размер которого устанавливается светом, летящим к нам из ранней Вселенной. Внутри горизонта — наша наблюдаемая Вселенная, а сразу за ним — таинственный лабиринт (вообще говоря, сразу за ним расположена совершенно такая же Вселенная, из областей которой свет просто еще не дошел до нас; космологический горизонт не представляет собой физическую границу. — Примеч. пер.).

**Мы — это наполненные водой многоклеточные тела, ощущающие себя в окружающем мире с помощью зрения, слуха, обоняния и осязания. Каким-то образом ощущения формируют сознание и неуловимое качество, называемое интеллектом. Быть может, иные формы жизни, обитающие где-то в космосе, сконструированы природой сходным образом и могут чувствовать и действовать так же, как мы**

Мы принадлежим узкой прослойке бытия, зажатой между крайностями невообразимо большого и исчезающе малого. Мы — это наполненные водой многоклеточные тела, ощущающие себя в окружающем мире с помощью зрения, слуха, обоняния и осязания. Каким-то образом ощущения формируют сознание и неуловимое качество, называемое интеллектом. Быть может, иные формы жизни, обитающие где-то в космосе, сконструированы природой сходным образом и могут чувствовать и действовать так же, как мы. А может быть, биологические земные формы — не единственно возможный вариант живых существ и где-то в других частях Вселенной несправедливы наши представления о том, что сознание и интеллект возникают в результате электрохимических процессов в мозге. Перед лицом тайны и осознавая себя живущими всего лишь в тонком пласте масштабов Вселенной, мы можем только надеяться на правильность нашего пути познания.

Вообще же наше положение во Вселенной довольно нелепо. Действительно, мы живем в месте, ужасно непригодном для обретения хоть каких-то

объективных знаний о природе реальности. Наша обитель — небольшая твердая планетка, которая вращается вокруг звезды, типичной среди триллиона триллионов звезд в наблюдаемой части Вселенной; каждый из нас заключен в обладающую самосознанием частичку плоти, всего лишь крошечное звено раскинувшейся на эоны биологической эволюции. И даже наши тела не принадлежат нам полностью, а служат полем дарвиновских сражений триллионов бактерий и вирусов. Вся жизнь, какой мы ее знаем, представляется возникшей только из-за взаимодействий не поддающегося осмыслению громадного числа молекулярных структур, ДНК и РНК. Последние состоят из протонов, нейтронов, электронов и подчиняются законам физики частиц и электромагнитным силам. Эти мельчайшие компоненты просто следуют фундаментальным «законам» Вселенной, которые родились 13,8 млрд лет назад и сохраняются до сих пор. Благодаря этим законам образуются галактики, планеты, люди, птицы и — кто знает? — еще какие-нибудь космические объекты и существа.

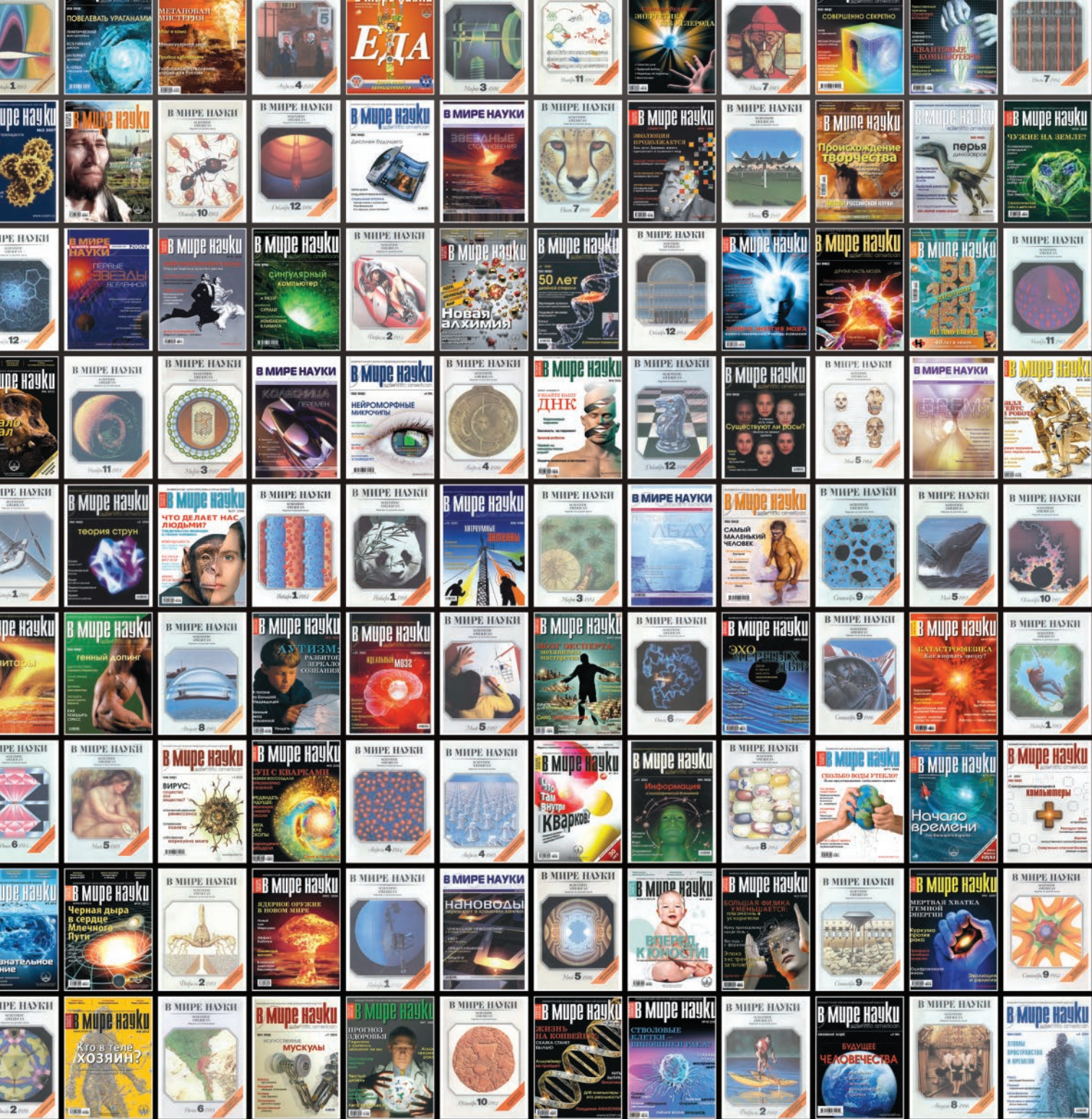
Как это все происходит? Как в действительности началась история нашей Вселенной и как эта история закончится, если она вообще когда-нибудь закончится? На все эти вопросы ученые пытаются найти ответы, строя рациональную картину мира и довольствуясь теми временем и местом, где было уготовлено жить человечеству. Любой ответ — это работа, находящаяся в вечном процессе. Однако уже должна существовать пусть туманная, но все же картина, родившаяся из нашего понимания пересечений головокругительных вселенских масштабов. Мы приглашаем читателей исследовать доступные нам пространства и восхищаться их красотой. В конце концов, это же наша Вселенная. ■

Перевод: О.С. Сажина

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Cosmic View: The Universe in Forty Jumps. Kees Boeke. John Day Company, 1957.
- Powers of Ten: A Book about the Relative Size of Things in the Universe and the Effect of Adding Another Zero. Philip Morrison and Phylis Morrison. Scientific American Library, 1982.
- Cosmic Eye. Video. Danail Obreschkow, 2012. [www.youtube.com/watch?v=jfSNxVqprvM](http://www.youtube.com/watch?v=jfSNxVqprvM)





## Хотите знать о науке больше?

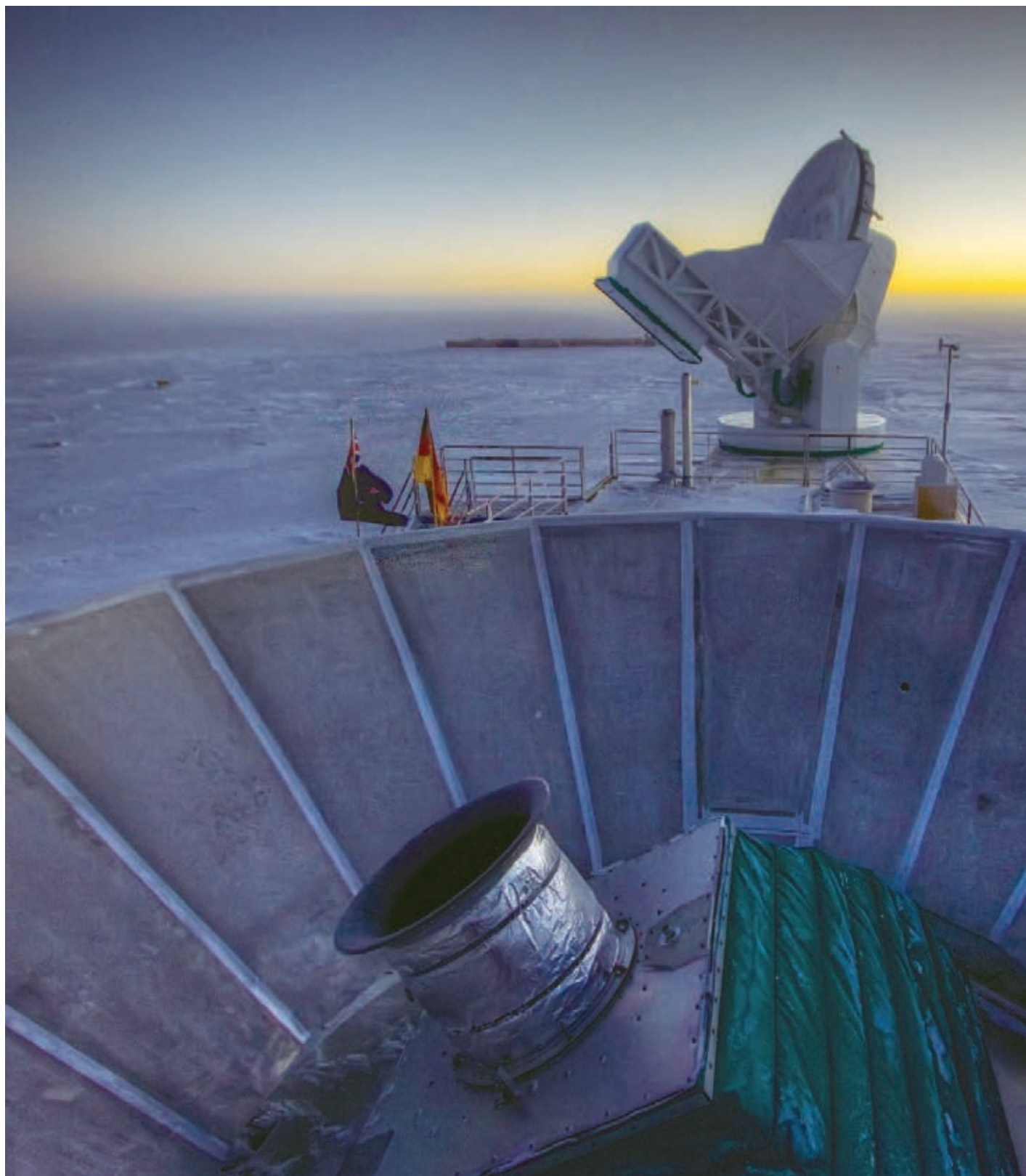
Полный архив выпусков журнала  
«В мире науки» — на сайте издания  
по адресу: [www.sciam.ru](http://www.sciam.ru)

**В мире науки**  
SCIENTIFIC AMERICAN

Теперь можно купить  
и отдельные статьи







**Полярные глаза:** VICEP2 — телескоп, установленный на станции Амундсен — Скотт на Южном полюсе; с января 2010 г. по декабрь 2012 г. телескоп наблюдал один и тот же небольшой участок неба: его целью был поиск проявлений первичных гравитационных волн в самом старом свете Вселенной





Лоуренс Краусс

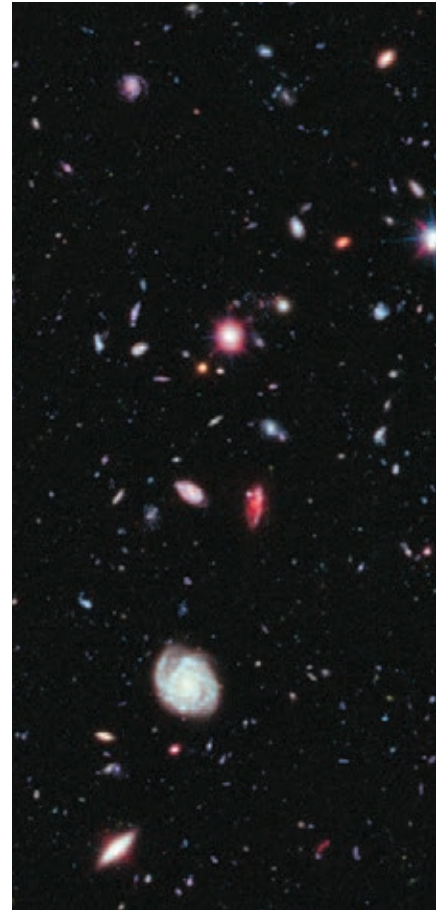
# Большого взрыва

# Маяк

*Дискуссии о возможном обнаружении идущих из ранней Вселенной гравитационных волн находятся под постоянным пристальным вниманием ученых. Будучи подтвержденным, это открытие позволит установить связь между гравитацией и квантовой теорией и, быть может, даже доказать существование других вселенных*

**ОБ АВТОРЕ**

**Лоуренс Краусс** (Lawrence M. Krauss) — физик-теоретик и космолог из Университета штата Аризона.



**В** марте 2014 г. группа ученых, работающих на микроволновом телескопе на Южном полюсе, опубликовала сообщение, взволновавшее научное сообщество. В нем говорилось об обнаружении гравитационных волн, рожденных в первые мгновения после Большого взрыва.

Наблюдения, будучи подтвержденными, окажутся важнейшими за последние десятилетия. Ученые смогут с определенностью сказать, как зародился наш мир, в то время как пока им приходится только спекулировать на эту тему. Кроме того, окажется возможным связать в единое целое лучшие теории субатомного (квантового) мира с лучшими теориями гравитации, описывающими массивные тела в космосе, основанными на общей теории относительности Эйнштейна. И, наконец, можно будет предоставить убедительные (пусть даже пока и косвенные) доказательства существования иных миров.

Как только поступило сообщение об открытии гравитационных волн, многие ученые задались вопросом, насколько оно реально. Скептицизм послужил основанием для организации большого количества новых независимых наблюдений, результаты которых будут известны уже в следующем году, что позволит окончательно подтвердить или опровергнуть анонсируемое открытие. Нам не придется долго ждать: скоро станет известно, действительно ли перед нами маяк ранней Вселенной, ведущий к ее неразгаданым тайнам.

**Дорога к теории инфляции**

Как родилась эта теория? Все началось с двух кажущихся парадоксов ранней Вселенной (разрешению которых сможет помочь открытие гравитационных волн).

Первая загадка относилась к свойствам крупномасштабной геометрии Вселенной. Сформировавшись в результате Большого взрыва около 13,8 млрд лет назад, Вселенная на протяжении всей своей жизни расширяется. Однако даже после такого длительного периода расширения Вселенная остается практически плоской. Мы живем в трехмерной плоской Вселенной, в которой лучи света (в среднем) распространяются по прямым линиям.

**! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

- В начале 2014 г. ученые сообщили о возможном открытии гравитационных волн, рожденных в первые моменты после Большого взрыва.
- Если открытие будет подтверждено, то ученые получат возможность исследовать уникальные физические процессы на стыке теории относительности и квантовой теории.
- Быть может, удастся получить косвенные свидетельства существования мультивселенной — бесконечного пространства с бесконечным набором отдельных вселенных.

PRECEDING PAGES: COURTESY OF STEFFEN RICHTER, Harvard University; THIS PAGE: COURTESY OF NASA, ESA, G. HILGENDORF, D. MADGE AND P. OESCH, University of California, Santa Cruz; R. BOUVEN, Stellenbosch University AND HUDFOO TEAM





**Однородная Вселенная.** На больших масштабах наша Вселенная выглядит однородной по всем направлениям. На снимке экстремально глубокого поля можно видеть, что в среднем плотность галактик одинакова. На площадке, по площади меньшей полной Луны, в результате многочасовых наблюдений Хаббловского космического телескопа были выявлены тысячи галактик. Однородность Вселенной на сверхбольших масштабах может быть объяснена экстремально быстрым расширением пространства сразу же после Большого взрыва.

Проблема в том, что такая плоскостность Вселенной маловероятна с точки зрения общей теории относительности. Если вещество или излучение — доминирующие формы энергии Вселенной, то небольшие отклонения от плоскостности с расширением будут только нарастать. Даже крошечное отклонение от плоскостности в ранней Вселенной привело бы к настоящему моменту к тому, что Вселенная была бы либо открытой (геометрия седловой поверхности), либо замкнутой (геометрия сферы). Для того чтобы Вселенная была плоской сегодня, необходимо, чтобы она была с огромной точностью идеально плоской в далеком прошлом.

Второй парадокс заключается в том, что Вселенная выглядит одинаково во всех направлениях: она изотропна. Это очень странно. Свет от поверхности последнего рассеяния успел добраться до нас, но не до областей «по другую сторону» от нас. Иначе говоря, области внутри нашей Вселенной (*превосходящие размерами три градуса*. — *Примеч. пер.*) никогда не сообщались друг с другом ни сейчас, ни в прошлом (они причинно не связаны). Но тогда каким же образом они стали такими похожими?

В 1980 г. молодой физик Алан Гут размышлял над этими двумя парадоксами и нашел решение: наша

Вселенная могла стремительно раздуться сразу же после Большого взрыва. Гут пришел к модели, которую назвал «инфляционной», размышляя о ключевом разделе физики элементарных частиц, а именно о спонтанном нарушении симметрии в стандартной модели и о последовательном обособлении физических взаимодействий при таких нарушениях.

Имеется доказательство, что спонтанное нарушение симметрии имело место во Вселенной по крайней мере один раз. Согласно теории электрослабого взаимодействия, два фундаментальных физических взаимодействия — электромагнитное и слабое — предстают перед нами различными из-за некоего «катаклизма» в ранней Вселенной. Когда-то давно эти взаимодействия были единым целым.

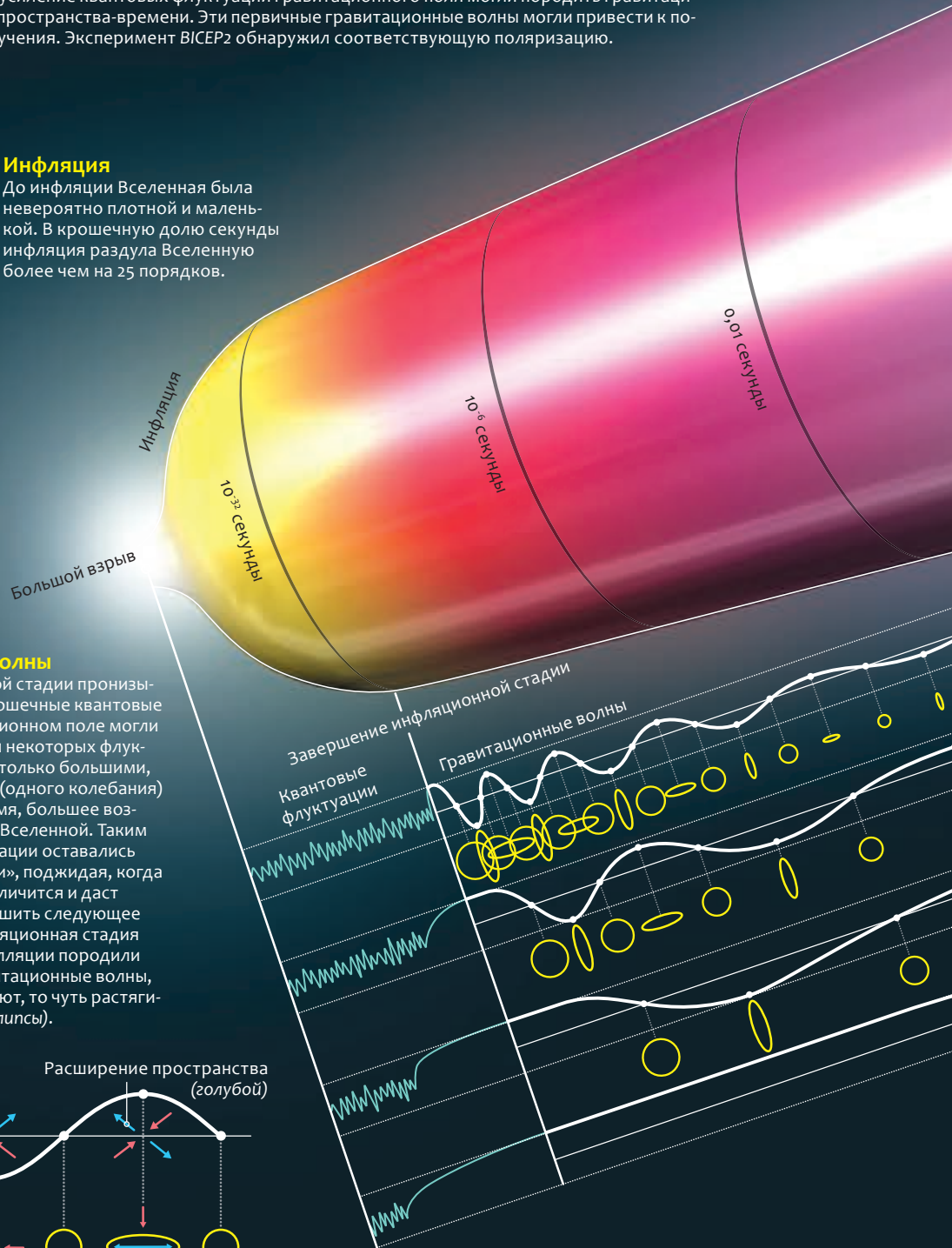
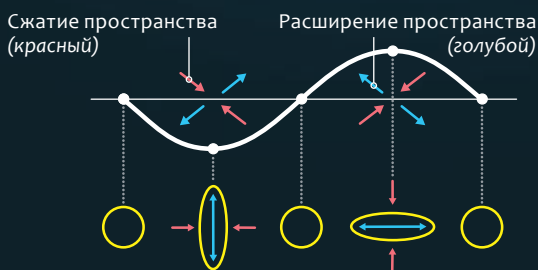
Вселенная с расширением охлаждалась. Когда Вселенной было от роду несколько миллионных долей от одной миллионной доли секунды, то произошел фазовый переход (сродни тому, как происходит образование кристалликов льда в охлаждаемой жидкости), который изменил природу пустого пространства-времени. Вселенная не была на самом деле пустой, она была заполнена особым фоновым полем (аналогией могло бы послужить

## ОТ ИНФЛЯЦИИ К ГРАВИТАЦИОННЫМ ВОЛНАМ НА ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

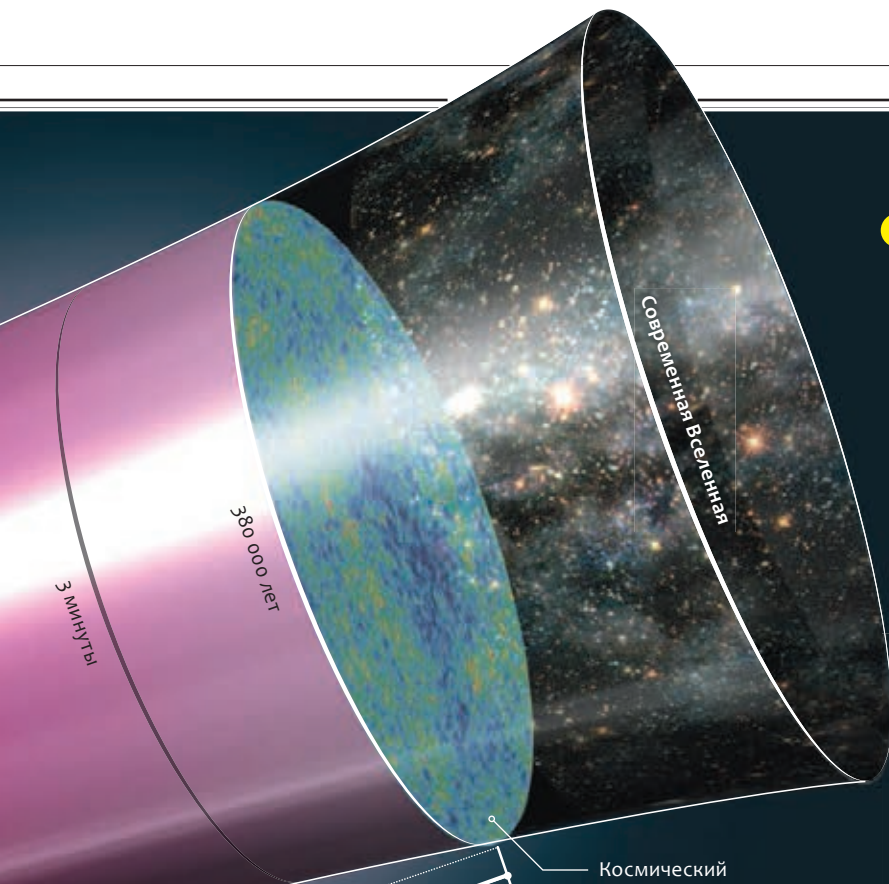
Доказательство существования инфляционной стадии в ранней Вселенной, когда она стремительно растянулась сразу же после своего рождения, мы могли бы найти в самом первом свете, который мы можем наблюдать: космическом микроволновом фоновом излучении. Этот свет был испущен через 380 тыс. лет после Большого взрыва. Во время инфляции усиление квантовых флуктуаций гравитационного поля могли породить гравитационные волны, рябь на ткани пространства-времени. Эти первичные гравитационные волны могли привести к поляризации реликтового излучения. Эксперимент *WMAP* обнаружил соответствующую поляризацию.

- 1 Инфляция**  
 До инфляции Вселенная была невероятно плотной и маленькой. В крошечную долю секунды инфляция раздула Вселенную более чем на 25 порядков.

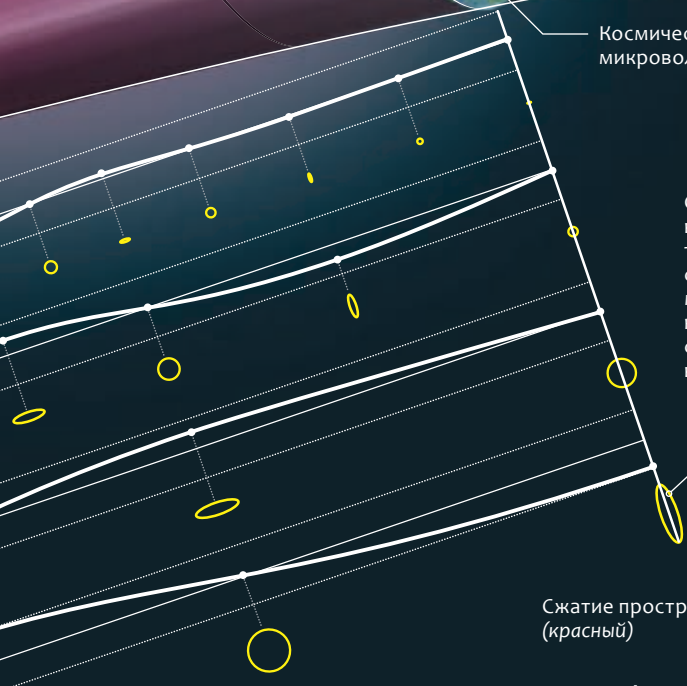
- 2 Гравитационные волны**  
 Во время инфляционной стадии пронизывающие Вселенную крошечные квантовые флуктуации в гравитационном поле могли быть растянуты. Длины некоторых флуктуаций могли стать настолько большими, что для их осцилляции (одного колебания) потребовалось бы время, большее возраста тогдашней юной Вселенной. Таким образом, такие флуктуации оставались как бы «вмороженными», ожидая, когда возраст Вселенной увеличится и даст им возможность совершить следующее колебание. Когда инфляционная стадия завершилась, эти осцилляции породили длинноволновые гравитационные волны, которые то чуть сжимают, то чуть растягивают пространство (эллипсы).







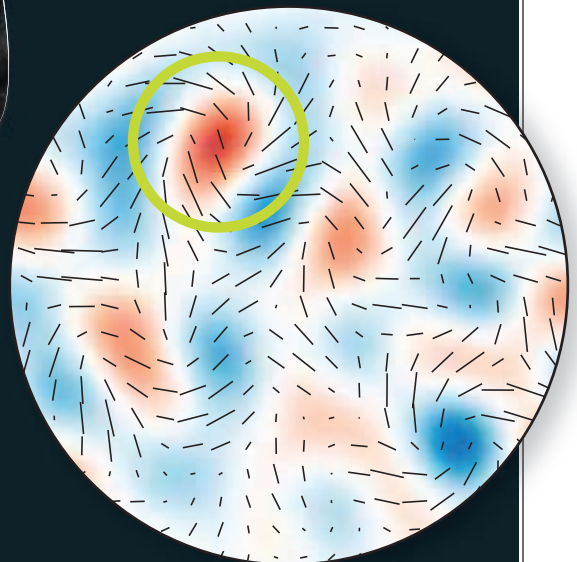
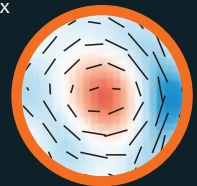
Космический микроволновой фон



Самые длинноволновые гравитационные волны с самыми большими амплитудами наиболее сильно сжимают и растягивают пространство

**4 «Флюгеры»**

Поляризация может быть различных типов. Обычная температура и флуктуации плотности в пространстве обладают круговой поляризацией (оранжевый кружок). Гравитационные волны создают направленную поляризацию (внизу). Красные пятна указывают области сжатого пространства, в таких потенциальных ямах скапливаются фотоны, отчего температура этих областей повышается. Голубым отмечены более холодные области.



**3 Поляризация**

Сжатие и растяжение пространства, вызываемые гравитационными волнами, могут влиять на амплитуды рассеянного микроволнового реликтового излучения, которые чуть увеличиваются в одном направлении и чуть уменьшаются в другом, т.е. реликтовое излучение приобретает поляризацию.

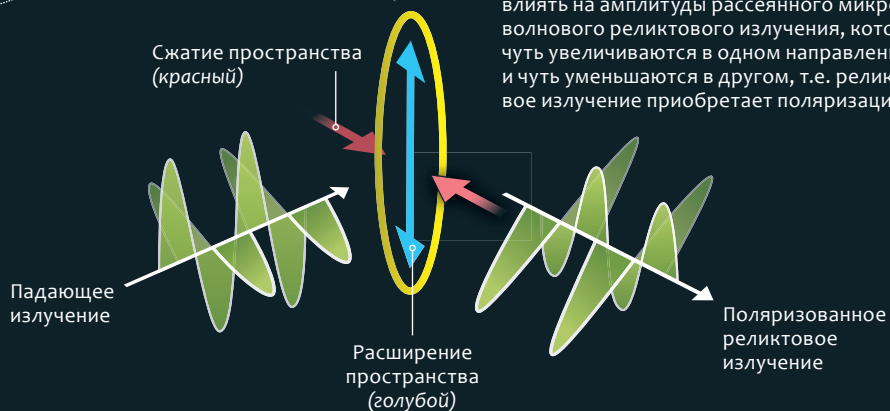
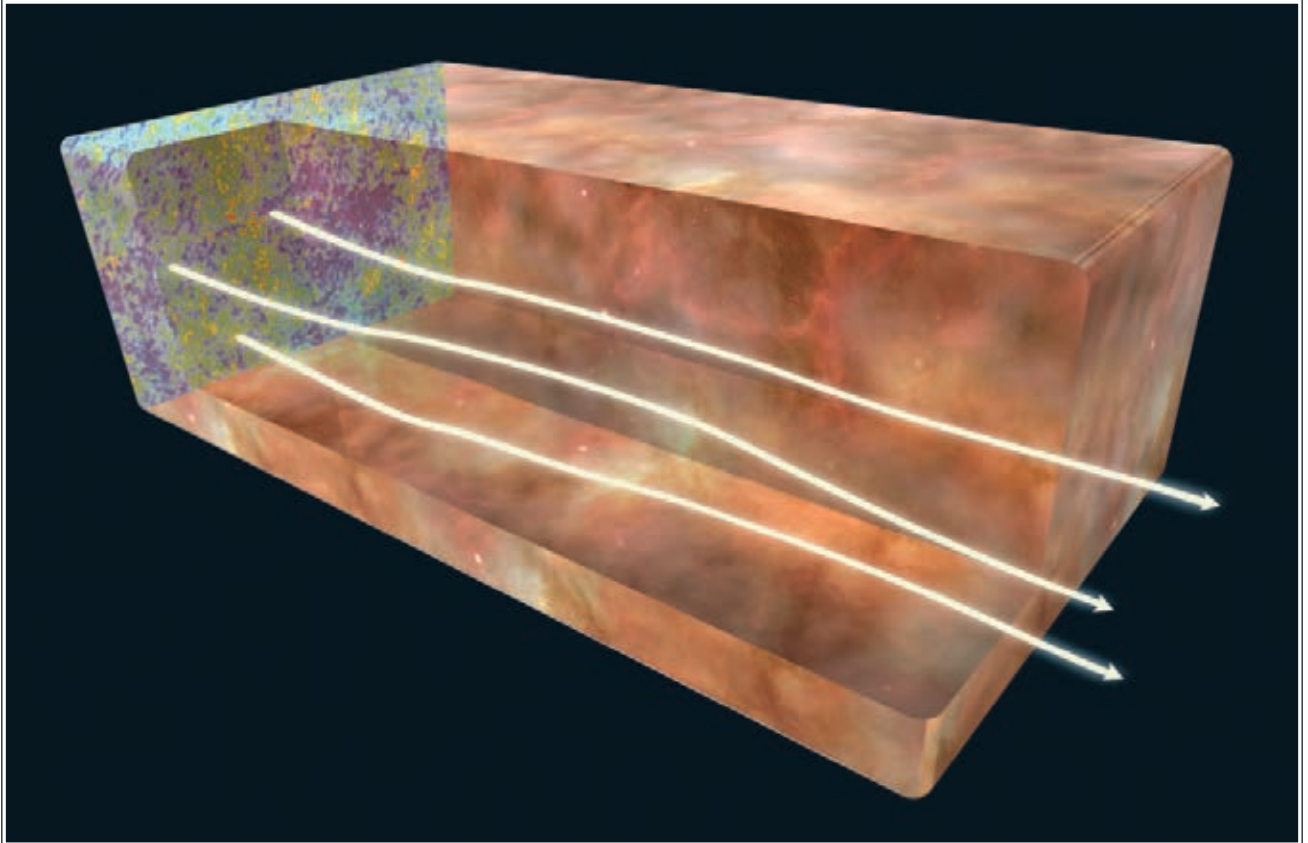


Illustration by Don Foley (universe) and Jen Christensen (schematics) BICEP2 COLLABORATION (polarization insets)

## ЭФФЕКТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Обнаружение поляризации космического фонового излучения (на илл. — *пестрая голубоватая поверхность*) еще не представляет собой доказательства существования гравитационных волн, потому что другие процессы могут давать вклад в эту поляризацию. Пути реликтовых фотонов (*искривленные линии*) могут, например, быть отклонены массивными галактическими скоплениями, чьи гравитационные поля искажают пространство-время вблизи себя (разновидность так называемого гравитационного линзирования). Этот эффект может приводить к поляризации реликтового излучения. Кроме того, частицы пыли нашего Млечного Пути излучают поляризованный свет, который трудно отличить от реликтового излучения. Недавняя обработка данных наблюдений космического радиотелескопа *Planck* показала большую вероятность указанного процесса.



электрическое поле, но тип данного поля был очень труден для обнаружения). Это фоновое поле, известное как поле Хиггса, было «выработано» всей Вселенной.

Поле Хиггса влияет на распространение частиц в пространстве. Те частицы, которые взаимодействуют с этим полем (например те, которые выступают переносчиками слабого взаимодействия), испытывают сопротивление и, следовательно, проявляют себя уже как массивные частицы. Другие частицы, которые не взаимодействуют с этим полем (например, фотон — переносчик электромагнитного поля), остаются безмассовыми. Таким образом, сила слабого взаимодействия и электромагнитная сила начинают обладать разными свойствами, нарушая симметрию, которая объединяла их. Эта удивительная модель была подтверждена на Большом адронном коллайдере (БАК) в CERN в 2012 г. с открытием бозона Хиггса.

Возможно, похожее нарушение симметрии могло случиться и в более ранней Вселенной. Силы электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий были объединены в одну. Только гравитационные силы стояли

особняком. Действительно, существует множество косвенных подтверждений существованию такого объединения, когда Вселенной было  $10^{-36}$  секунд от роду. С охлаждением Вселенной могли происходить процессы фазовых переходов, спонтанные нарушения симметрии, которые меняли природу пространства, вовлекая фоновое поле, которое заставило электрослабые взаимодействия вести себя иначе, чем сильные взаимодействия.

Так же как и в случае поля Хиггса, нарушающее симметрию гипотетическое поле должно порождать экзотические и очень массивные частицы, но вовлеченные в этот процесс массы должны быть гораздо больше, чем масса хиггсовской частицы. Фактически это означает, что для прямого поиска соответствующих экспериментальных подтверждений необходимо создать ускоритель в 10 млрд раз мощнее, чем БАК. Требуемая такой проверки теория носит название теории великого объединения, поскольку она дает единое описание трем типам физических взаимодействий, исключая только гравитационное.



Спонтанное нарушение симметрии в ранней Вселенной могло бы, по мнению Гута, решить все проблемы стандартной теории Большого взрыва, если бы только поле, отвечающее за такое нарушение симметрии, смогло хотя бы короткий промежуток времени побыть в метастабильном состоянии.

Вода переходит в метастабильное состояние, когда внешняя температура быстро падает ниже точки замерзания воды. При таких условиях вода не замерзает сразу. Когда же она все-таки наконец замерзнет (полностью завершится фазовый переход), то выделит тепло, называемое скрытой теплотой.

Схожим образом поле, вызывающее фазовые переходы в теории великого объединения, могло бы передать энергию в окружающее пространство. Во время краткого периода инфляции эта энергия могла создать

## **Несмотря на убедительность теории инфляции, ученые до сих пор не знают, как именно она происходила. Причина этого — большая неопределенность в наших знаниях об объединении взаимодействий и прежде всего о шкалах энергий, сопровождавших это объединение**

гравитационное отталкивание, которое заставило Вселенную расширяться экспоненциально быстро. Благодаря этому расширению к сегодняшнему моменту Вселенная могла увеличить свой размер на 25 порядков за промежуток времени  $10^{-36}$  с. Такое стремительное расширение может обеспечить наблюдаемую сегодня плоскостность и изотропию Вселенной, успешно разрешив два обсуждаемых выше парадокса.

Несмотря на убедительность теории инфляции, ученые до сих пор не знают, как именно она происходила. Причина этого — большая неопределенность в наших знаниях об объединении взаимодействий и прежде всего о шкалах энергий, сопровождавших это объединение. Простейшие варианты теории инфляции объясняют многое из того, что мы наблюдаем в современной Вселенной. Однако различные инфляционные модели могут порождать сильно отличающиеся друг от друга миры.

Для того чтобы доказать, была ли инфляция, необходимо отыскать способ непосредственного, прямого исследования ранней Вселенной. Другими словами, исследовать

физические процессы, характерные для тех далеких времен. Оказывается, гравитационные волны предоставляют ученым такую возможность.

### **Следы гравитационных волн**

Альберт Эйнштейн, опубликовав в 1915 г. общую теорию относительности, понял, что она приводит с новым интереснейшим физическим феноменам. В общей теории относительности гравитационное поле — это рябь фоновое пространства-времени. Источник энергии, переменный во времени (например, планета, двигающаяся вокруг своей звезды, или двойная звездная система), должен генерировать искажения метрики, также переменные во времени, распространяющиеся от этого источника со скоростью света. Если в окрестности проходят гравитационные волны, то расстояние между объектами указанных систем будет немного меняться.

Поскольку гравитационное взаимодействие очень слабо в сравнении с электромагнитным, то гравитационные волны очень трудно зарегистрировать. Эйнштейн даже сомневался, можно ли их вообще будет когда-нибудь уловить. Спустя почти 100 лет после предсказания гравитационных волн ученые все еще не могут измерять их непосредственно. Самые хорошие кандидаты, чьей колоссальной мощности должно быть достаточно для регистрации гравитационных волн, — это системы двух сливающихся черных дыр. Но исследование таких катастрофических астрофизических феноменов пока к успеху не привели. К счастью, Вселенная может предложить более мощный источник гравитационных волн — флуктуирующие квантовые поля, рожденные в первые моменты после Большого взрыва.

Когда Вселенная была очень молода, до начала инфляционной стадии, она была упакована в объем, много меньший размеров атома. На таких крошечных масштабах доминировали законы квантовой физики. Однако, поскольку в таком объеме сосредоточена и гигантская энергия, то описание процессов с необходимостью требует релятивистской теории. Для понимания физических свойств ранней Вселенной необходимо использовать квантовую теорию, в то же время описывающую пространство и время. Согласно квантовой теории поля, на очень малых масштабах все квантово-механические поля флуктуируют. Если все другие квантовые поля ведут себя похожим образом, в то время как плотность инфляционной энергии управляет расширением Вселенной, то гравитационные поля могут также обладать флуктуациями.

Во время инфляционного экспоненциального расширения все начальные квантовые флуктуации с малыми длинами волн окажутся сильно растянутыми. Если длины волн становятся достаточно большими, то время, необходимое такой флуктуации для осцилляции, будет становиться больше, чем возраст Вселенной. Квантовые флуктуации будут как бы «вмороженными» до тех пор, пока Вселенная не станет достаточно старой, чтобы наступило время для следующей осцилляции. Во время инфляционной стадии вмороженные осцилляции будут

расти: процесс, которые усиливает начальные квантовые осцилляции в классические гравитационные волны.

В то время, когда Гут предложил свою инфляционную модель, советские физики А.А. Старобинский, В.А. Рубаков, М.В. Сажин и их коллеги независимо отметили, что во время инфляции всегда образуется гравитационно-волновой фон, а интенсивность гравитационных волн определяется энергией, заключенной в инфляционном поле. Другими словами, если мы сможем обнаружить гравитационные волны, идущие от инфляционной стадии, то мы не только получим подтверждение того факта, что инфляция действительно была, но также сможем глубже понять квантовые процессы, которые породили инфляцию.

### Дым после выстрела

Однозначное указание на инфляцию имеет смысл только в том случае, если это указание будет наблюдаемо. Масштабы инфляции ожидаются сравнимыми с расстояниями, на которых гравитационно-квантовые «узелки» должны быть большими. Однако из-за слабости гравитационных сил самих по себе задача поиска гравитационных волн, порождаемых инфляционным полем, в лучшем случае очень сложна.

Сложна, но не невозможна. Решению может помочь космическое микроволновое фоновое излучение. Это реликтовое излучение образовалось в ранней Вселенной, когда та остыла настолько, что протоны захватили электроны, сформировав нейтральные атомы, а фотоны смогли распространяться свободно. Вселенная стала прозрачной для излучения, и это первое, самое старое реликтовое излучение сейчас доступно наблюдениям. Если гравитационные волны существовали в больших масштабах в то время, когда родилось реликтовое излучение (Вселенной тогда было 380 тыс. лет), то его следы могут «отпечататься» на этом излучении. Температура реликтового излучения была бы чуть выше по одним направлениям и чуть ниже по другим — за счет того, что крупномасштабные гравитационные волны немного растягивали пространство в одном направлении и немного сжимали в другом. Если эффект достаточно большой, то должна наблюдаться характерная анизотропия реликтового излучения, которая может быть обнаружена. Кроме того, гравитационные волны могут порождать и более тонкий эффект. Чуть искажая метрику пространства, гравитационные волны служат причиной рассеяния фотонов реликтового излучения на электронах, в результате чего реликтовое излучение становится поляризованным.

Само по себе наличие поляризации в реликтовом излучении еще не доказывает существования гравитационных волн. Существует много других возможностей объяснить наличие поляризации — например, она может быть вызвана температурными флуктуациями в реликтовом излучении или излучением возможных фоновых источников, например поляризованной пылью в нашей Галактике. Можно попробовать отделить возможный вклад гравитационных волн от других источников, исследуя пространственные структуры поляризации на картах неба.

Так, круговое направление поляризации может характеризовать гравитационные волны. Большинство других источников не дают такой структуры. Дело в том, что поляризация представляется в виде так называемых *E*- и *B*-мод. *B*-мода, имеющая закрученный вид, ассоциируется с гравитационными волнами. *E*-моду могут порождать другие источники.

Понимание того, что гравитационные волны могут влиять на поляризацию реликтового излучения, сильно воодушевило научное сообщество, поскольку такой метод может дать дополнительный шанс распознать гравитационные волны, влияние которых непосредственно на анизотропию температуры реликтового излучения очень мало. За прошедшее десятилетие было разработано много экспериментов, как наземных, так и космических, предназначенных для поиска гравитационных волн, этого «святого Грааля» инфляции.

Поскольку наблюдатели уже измерили температурные флуктуации космического микроволнового излучения, исследователи представляют свои результаты в терминах отношения сигнала возможной поляризации от гравитационных волн к величине измеренного сигнала температурных флуктуаций. В литературе это отношение обозначается буквой *g*.

### Новые результаты

До 2014 г. исследователями, обрабатывающими наблюдательные данные, сообщалось только о верхних пределах на величину поляризации реликтового излучения. Другими словами, поляризация не должна превышать некоторого уровня (иначе она была бы уже наблюдаема). Европейское космическое агентство миссии *Planck* объявило, что, согласно их измерениям, допустимый интервал для величины *g* меняется от нуля (что соответствует отсутствию гравитационных волн) до 0,13. Весь научный мир был взбудоражен сенсацией в марте 2014 г., когда команда расположенного на Южном полюсе эксперимента по изучению космической внегалактической поляризации (*Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2, BICEP2*) объявила об обнаружении *g* порядка 0,2, повысив предел, полученный *Planck*. Это означало, что гравитационные волны существуют. Было также заявлено, что вероятность того, что обнаруженный поляризационный сигнал вызван другими фоновыми процессами, меньше одной миллионной. Свойства сигнала характеризуют его именно как сигнал, ожидаемый от инфляционного периода.

К сожалению, на момент написания этой статьи ситуация оставалась до конца не проясненной. Дело в том, что наблюдения поляризации реликтового излучения очень сложны, и, несмотря на то что обнаруженный сигнал статистически значим, существуют и другие астрофизические процессы, которые могут генерировать схожий сигнал.

Команда эксперимента *BICEP2* исследует все возможные альтернативные источники поляризованного сигнала. Самый значимый из них — излучение поляризованной пыли нашей Галактики, которое, по результатам



команды *BICEP*, все-таки не может объяснить полученный сигнал. Однако в последние месяцы были обработаны новые данные *Planck*, которые показали, что в нашей Галактике может находиться больше пыли, следовательно, ее вклад может оказаться более существенным, чем это предполагалось. Несколько научных групп независимо анализировали данные *BICEP2* с учетом последних данных миссии *Planck*, добавляя разнообразные модели галактической пыли, проверенные ранее в других экспериментах. Заключение оказалось таковым: пыль способна воспроизвести весь (или практически весь) обнаруженный поляризационный сигнал. Несмотря на то что проделанные исследования поколебали уверенность некоторых ученых, команда *BICEP2* продолжает настаивать на правильности обработки своих данных и значимости полученного сигнала, хотя признает, что не может полностью исключить альтернативное объяснение сигнала как следствие наличия галактической пыли.

## **Если результаты эксперимента *BICEP2* подтвердятся и если действительно существуют гравитационные волны от инфляционной стадии Вселенной, то гравитация должна быть описана в рамках квантовой теории**

Ученые также отмечают, что профиль наблюдаемого спектра сигнала совпадает с предсказанным инфляцией лучше, чем это можно было бы сделать с помощью пыли.

Важно отметить, что производятся все новые эксперименты по исследованию излучения пыли, которые могут определять ее поляризацию в разных направлениях и на разных масштабах. Если и будет получено опровержение результатов *BICEP2*, то это будет сделано в ближайший год.

### **Что скрывают гравитационные волны?**

Если сигнал *BICEP2* будет подтвержден, то замочная скважина нашего эмпирического опыта о процессах в ранней Вселенной превратится в широкое окно. Гравитационные волны настолько слабо взаимодействуют с веществом, что они могут путешествовать почти свободно от начала времен. Открытие гравитационных волн могло бы не только наблюдательно подтвердить одно из фундаментальных положений общей теории относительности, но и непосредственно донести до нас

сигнал из тех областей пространства, когда Вселенной было  $10^{-36}$  секунд от рода — на 49 порядков раньше, чем образовалось реликтовое излучение. Последнее на сегодняшний момент выступает единственным источником информации о ранней Вселенной.

Если обнаруженный сигнал — действительно след от инфляционной стадии, то наши знания об устройстве Вселенной существенно расширятся. Во-первых, предполагаемая (из наблюдений) мощность гравитационно-волнового сигнала будет означать, что инфляция произошла в том месте энергетической шкалы, которое близко к моменту объединения трех негравитационных сил фундаментальных взаимодействий. А это верно, только если верны наши предположения о так называемой суперсимметрии в природе. Существование суперсимметрии, в свою очередь, может быть обосновано наличием множества новых частиц с массами в диапазоне, который доступен на БАК (когда он снова включится в 2015 г.). Таким образом, если данные *BICEP2* верны, то следующий год окажется знаковым для физики элементарных частиц.

Существует и другое, менее спекулятивное приложение к открытию инфляционных гравитационных волн. Как было сказано выше, такие волны должны генерироваться, когда первичные квантовые флуктуации в гравитационном поле усиливаются во время инфляции. Но если это так, то гравитация должна найти описание в рамках квантовой теории. Это утверждение очень важно, потому что в настоящий момент у нас есть не слишком хорошая (плохо определенная и довольно противоречивая) квантовая гравитация, т.е. мы не обладаем теорией, способной описывать гравитацию с помощью правил, применимых для описания вещества и энергии на очень малых масштабах. Теория струн — возможно, один из лучших кандидатов на роль такой теории, однако до сих пор нет свидетельств в пользу того, что эта теория верна. Кроме того, как отметил Фримен Дайсон (Freeman Dyson) из Принстонского института перспективных исследований в Нью-Джерси, не существует прибора, способного регистрировать отдельные гравитоны (гипотетические частицы — переносчики гравитационного взаимодействия), потому что такой прибор должен быть настолько большим и массивным, что он коллапсирует в черную дыру прежде, чем сможет завершить наблюдение. Таким образом, мы никогда не сможем экспериментально убедиться в том, что гравитация обладает квантовой природой. Если гравитационные волны от инфляции действительно удалось обнаружить, то это, казалось бы, будет сделано в обход аргументов Дайсона. Однако если обнаруженные гравитационные волны будут классическими (неквантовыми) объектами, то мы должны путем квантово-механических вычислений определить источник этих волн. Просто наблюдая полет мяча (классического макрообъекта), мы не можем доказать, что его движение определяется квантовой механикой: он бы летел точно так же, если бы квантовой механики не было вовсе. Что нам нужно доказать в случае «классических»

гравитационных волн — так это то, что они в отличие от движущегося мячика были инициированы именно квантовыми процессами.

Недавно Фрэнк Вилчек (Frank Wilczek) из Массачусетского технологического института совместно с автором этой статьи смогли разобраться в этом вопросе. Так, используя элементарную базовую технику физических расчетов, а именно анализ размерностей, они смогли показать, что энергия гравитационно-волнового фона, порожденного только инфляцией, падала бы с уменьшением постоянной Планка. Таким образом, они полагают, что этим доказали квантовую природу инфляционных гравитационных волн.

### Последствия для мультивселенной

Понимание истоков нашего мира и корректная постановка вопроса, откуда вообще взялась наша Вселенная, — вот цели исследования инфляционного расширения ранней Вселенной при помощи гравитационных волн. Эти глубокие проблемы балансируют на грани метафизики, однако могут быть переведены на язык строгой физики.

Напомним, что инфляция создается неким полем, которое хранит и во время фазового перехода высвобождает огромное количество энергии. Оказывается, характерным свойством инфляции выступает то, что, однажды начавшись, она никогда не должна закончиться и будет раздувать и раздувать Вселенную до бесконечности. При этом никогда не сформируется наблюдаемая нами картина — материя и излучение, не успев толком сформироваться, будут стремительно разлетаться, размазываться. Не будет ни галактик, ни звезд, ни планет, а только стремительно расширяющееся пустое пространство. Другими словами, такой инфляционный сценарий абсолютно не удовлетворяет наблюдательным данным.

Профессор Стэнфордского университета Андрей Линде нашел способ избежать этой проблемы. Он показал, что, как только в какой-нибудь небольшой области пространства после экспоненциального расширения завершится фазовый переход, эта область окажется в состоянии вместить всю наблюдаемую нами сегодня Вселенную. В оставшемся пространстве инфляция может продолжаться вечно. Кое-где будут образовываться небольшие области, где фазовый переход завершился. В каждой такой области, абсолютно и навсегда изолированной от всех других стремительным инфляционным расширением, может происходить свой Большой взрыв с последующим формированием вселенной, в чем-то аналогичной нашей. Это так называемая модель «вечной инфляции». В ней наша Вселенная — часть гораздо большей структуры, которая может быть бесконечной по объему и может содержать любое сколь угодно большое количество не связанных друг с другом вселенных, уже сформированных, формирующихся или тех, которые только будут формироваться. Более того, физические законы в каждом из этого множества миров могут быть очень разными, поскольку фазовые переходы могут происходить разными путями.

Такая гипотеза носит название гипотезы мультивселенной, в которой нашей Вселенной отводится равноправное место в бесконечном наборе других миров. Эта гипотеза может легко объяснить, почему параметры нашей Вселенной именно такие, а не другие, — в противном случае не было бы нас, чтобы задать такой вопрос. Рассуждения такого рода принадлежат разновидности так называемого антропного принципа. Многие ученые относятся к антропному принципу с большим скептицизмом, сетуя, как иногда сильно может приблизиться к метафизике строгая наука, традиционно базирующаяся на математических расчетах и эмпирическом познании мира.

Однако если эксперимент *BICEP2* (а также БАК и другие эксперименты) позволят исследовать феномены инфляции и великого объединения, то окажется возможным однозначно определить фундаментальные физические законы, управляющие ранней Вселенной при сверхвысоких энергиях и в сверхмалых масштабах. Быть может, будет подтвержден предложенный Линде механизм вечной инфляции. В этом случае мы, хотя никогда не сможем увидеть другие миры, будем знать наверняка, что они все-таки существуют, — подобно тому как наши предшественники в начале XX в. знали о существовании атома, хотя и не видели его.

Наблюдения и эксперименты по исследованию поляризации реликтового излучения и интерпретация данных продолжаются — и мы не знаем, чем это закончится. Но разве не в такой азартной погоне за тайнами мироздания заключалась и заключается привлекательность науки? ■

Перевод: О.С. Сажина

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Ликкен Д., Спиропулу М. Суперсимметрия и кризис в физике // ВМН, № 7–8, 2014.
- Grand Unification, Gravitational Waves, and the Cosmic Microwave Background Anisotropy. Lawrence M. Krauss and Martin White in *Physical Review Letters*, Vol. 69, No. 6, pages 869–872; August 10, 1992.
- Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background. Uro Seljak and Matias Zaldarriain in *Physical Review Letters*, Vol. 78, No. 11, pages 2054–2057; March 17, 1997.
- Statistics of Cosmic Microwave Background Polarization. Marc Kamionkowski, Arthur Kosowsky and Albert Stebbins in *Physical Review D*, Vol. 55, No. 12, pages 7368–7388; June 15, 1997.
- Primordial Gravitational Waves and Cosmology. Lawrence M. Krauss et al. in *Science*, Vol. 328, pages 989–992; May 21, 2010.
- A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing. Lawrence M. Krauss. Free Press, 2012.
- Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by *BICEP2*. P.A.R. Ade et al. (*BICEP2* Collaboration) in *Physical Review Letters*, Vol. 112, No. 24, Article No. 241101; June 19, 2014.



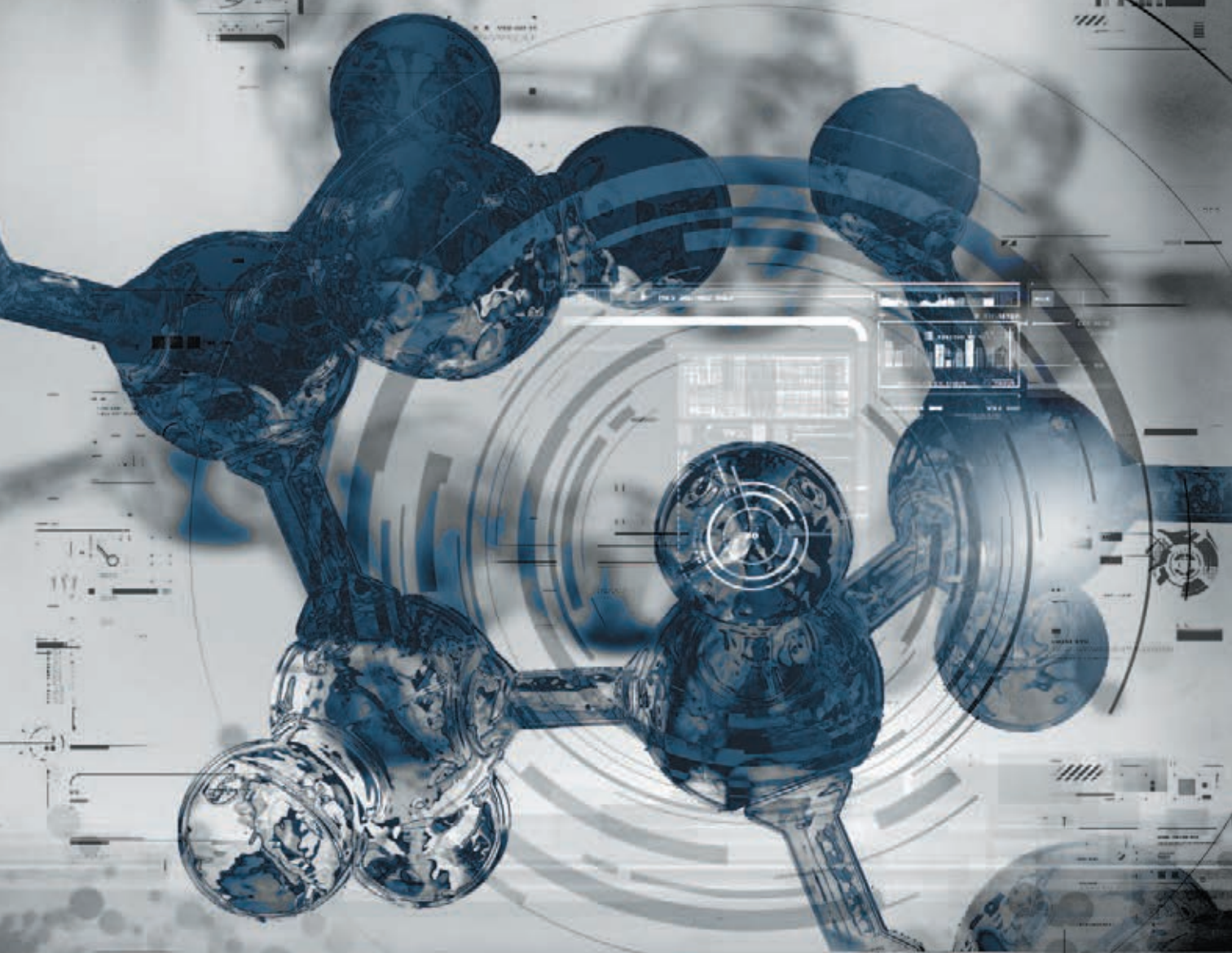
16+



[www.naukatv.ru](http://www.naukatv.ru)



[www.facebook.com/nauka20](https://www.facebook.com/nauka20)



2.0

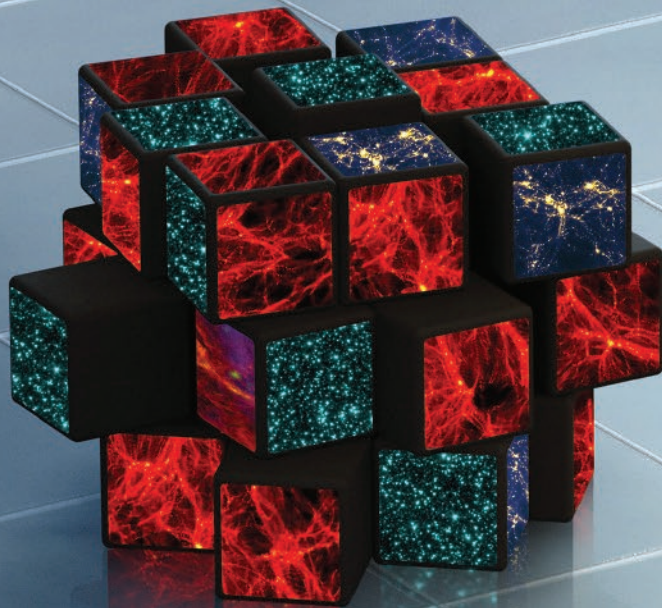
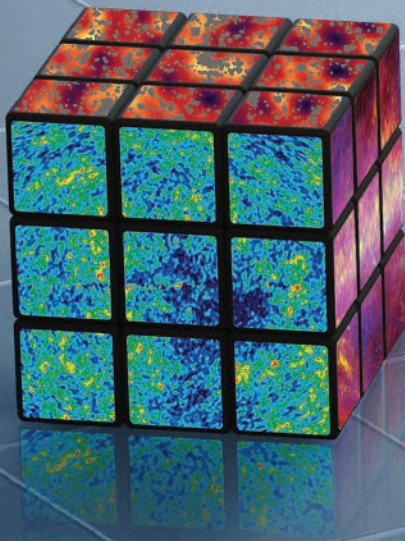
ПРОСТО О  
СЛОЖНОМ



НАУКА 2.0  
ТЕЛЕКАНАЛ

РЕКЛАМА





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 covered in a dense pattern of small, multi-colored stars (blue, white, yellow, and red), resembling a star field or a galaxy. The cubes are arranged in a somewhat haphazard manner, with some stacked together and others standing alone. 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

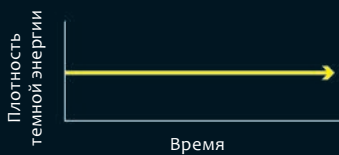
Ученые называют темной энергией то, что вызывает ускоренное расширение нашей Вселенной. Объяснения феномена темной энергии можно условно разделить на три категории. Во-первых, это может быть неизменяемая энергия пустого пространства (гипотеза космологической постоянной). Во-вторых, переменная энергия, 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**

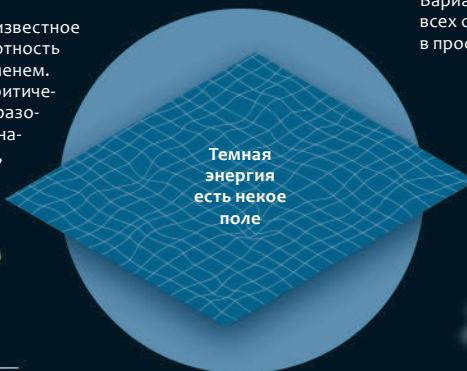
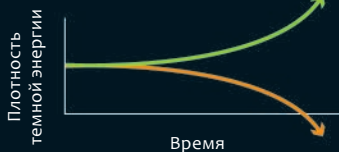
**Космологическая постоянная**

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.



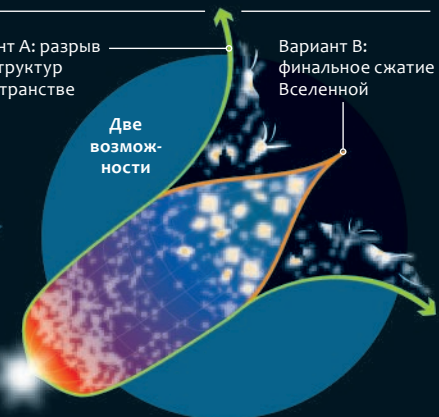
**Квинтэссенция**

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

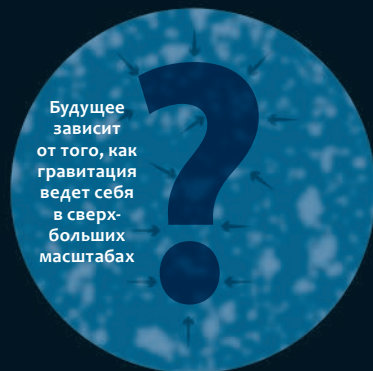
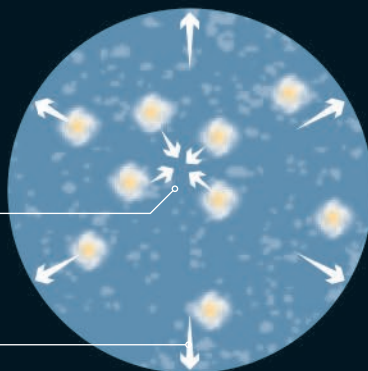


**Темной энергии нет**

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



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?

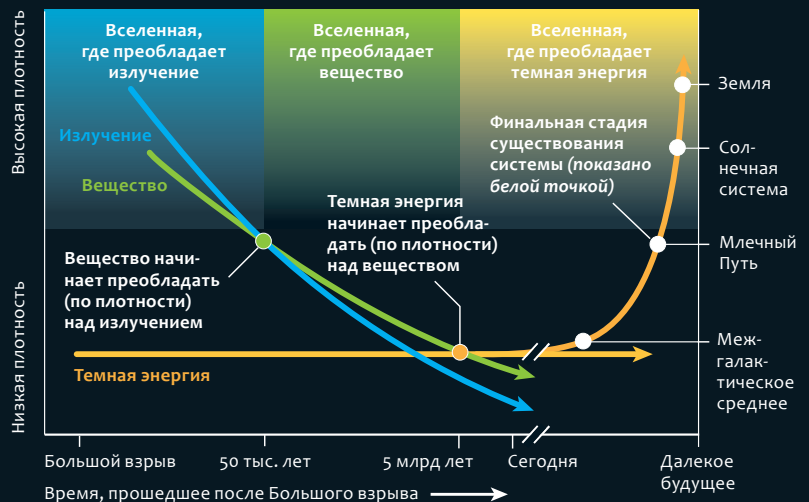
Свойства темной энергии определяют окончательный размер Вселенной. Так, если темная энергия — это действительно энергия пустого пространства (т.е. космологическая постоянная), то ускоренное расширение будет продолжаться



## 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 мультививере?

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 мультививере. 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 изменений 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.



КОСМОЛОГИЯ

# САМОЕ ПУСТОЕ МЕСТО В КОСМОСЕ

Попытки объяснить странное холодное пятно в космосе привели ученых к открытию еще более странному: гигантской и почти совершенно пустой области

Иштван Сапуди

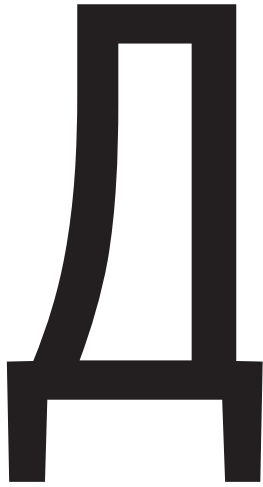






## ОБ АВТОРЕ

**Иштван Сапуди** (István Szapudi) — астроном из Института астрономии Гавайского университета. Работает в области космологии и крупномасштабной структуры Вселенной.



Для того чтобы увидеть самый древний свет во Вселенной, просто включите старый телевизор между каналами. Дрожащий ковер из точек и узоров — это результат воздействия на телевизионную антенну фотонов, испущенных 13,8 млрд лет назад, в эпоху, близкую к Большому взрыву. Эти фотоны с температурой около  $2,7^\circ\text{K}$  летят к нам со всех сторон, почти равномерно заполняя все пространство, и формируют космический микроволновой фон (реликтовое излучение). Реликтовые фотоны — самый древний свет, и поэтому двумерную карту реликтового излучения часто называют детской фотографией Вселенной. Благодаря этой карте можно узнать о том, какова была ранняя Вселенная, и понять, почему мир вокруг нас таков, каким мы его видим.

Детская фотография Вселенной не лишена недостатков, называемых также аномалиями, потому что они не могут быть объяснены с помощью современной стандартной космологической модели. Одна из самых больших аномалий — так называемое холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения — была детально изучена по данным космической миссии *NASA WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). Это пятно по площади равно примерно 20 Лунам, как мы ее видим с Земли. Для одних ученых эта аномалия — досадная неприятность, нарушающая стройную картину стандартной космологической модели, а для других — источник научного любопытства и куража перед неизвестным.

Одно из возможных объяснений аномалии холодного пятна на карте анизотропии реликтового

излучения — это случайность. Другими словами, пятно возникло спонтанно и не представляет собой следствие каких-то особых причин. Однако, по оценкам ученых, вероятность такого случайного события невелика, примерно полпроцента. Другие возможности представлены широчайшим спектром — от рациональных до совершенно фантастических: от допущения проблем в наблюдательной технике и до наличия портала в другие измерения и прочих проявлений скрытых размерностей.

В 2007 г. было высказано предположение, что холодное пятно может быть следствием существования в космосе гигантской пустой области (так называемого войда), почти лишенной и галактик, и межгалактического вещества, и тогда положение этой области должно было бы коррелировать с положением холодного пятна на карте. Этот войд

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Космическое фоновое микроволновое излучение (реликтовое излучение) — самый древний свет, который пронизывает Вселенную. Анизотропия реликтового излучения содержит странное «холодное пятно», в котором температуры реликтовых фотонов несколько ниже среднего фона.
- Одно из возможных объяснений — предположение о существовании сверхвойда, гигантской и относительно пустой области, по пространственному положению совпадающей с холодным пятном. Фотоны света, идущие через нестационарный (то есть ускоренно расширяющийся) сверхвойд, изменяют энергию, уменьшая или увеличивая ее в зависимости от гравитационного потенциала (ансамбль таких фотонов изменяет температуру, становясь то холоднее, то горячее), — это интегральный эффект Сакса — Вольфа.
- Недавно астрономы предположительно открыли сверхвойд протяженностью 1,8 млрд световых лет, лежащий в той же области неба, что и холодное пятно. Однако пока наблюдательных данных недостаточно для доказательства однозначной связи этих двух структур.





**Сканирование неба** с помощью панорамного Обзорного телескопа и Системы быстрого реагирования (Pan-STARRS) на острове Мауи помогло астрономам предположительно обнаружить огромное пустое пространство — сверхвойд, которое могло бы объяснить холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения

оказался бы наипустейшим местом во всей Вселенной, этаким редчайшим пузырем в сравнительно плотном окружении. Если такая пустота действительно существует, то ее исследование может быть очень полезным для понимания природы темной энергии, состав которой до сих пор неизвестен, но которая с уверенностью признается источником ускоренного расширения Вселенной. В настоящее время ведутся активные исследования, действительно ли положения войды и холодного пятна на карте анизотропии реликтового излучения совпадают.

### Рассекая пустоту

Ученые пришли к мысли, что может существовать сверхвойд, порождающий холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения за счет того, что свет проходит через группы меньших войдов. Предполагаемый сверхвойд представляет собой крайность, но войды меньшего размера, содержащие малое число галактик, — обычное явление во Вселенной. Так же обычны и их противоположности — скопления галактик. Космологи считают, что неоднородность распределения вещества на сверхбольших масштабах зародилась в ранней

Вселенной из флуктуаций плотности, которые, в свою очередь, могли быть следствием квантово-механических процессов. Другими словами, в ранней Вселенной существовал контраст плотности, который позже развился в крупномасштабную структуру. Чем больше масса, тем сильнее гравитационное поле, которое она создает, что, в свою очередь, привлекает в такие области новую массу. Те области, от которых уходит масса, и становятся войдами.

Поскольку войды содержат очень мало вещества, то с точки зрения распределения гравитационных полей они похожи на холмы, с которых все скатывается (*холмы гравитационного потенциала*. — *Примеч. пер.*). Так, если частица движется в войде от источников сильного гравитационного притяжения, расположенных во внешних областях, она замедляется, как шарик, который запустили катиться вверх по склону холма. Как только частица начинает двигаться в сторону границы войда, она разгоняется, как шарик, катящийся вниз по склону. Аналогично ведут себя и реликтовые фотоны, которые изменяют энергию, то есть частоту (скорость фотонов не меняется и остается всегда постоянной и равной скорости света в вакууме).

Изменение частоты для одного фотона соответствует изменению температуры для ансамбля фотонов. Когда фотоны попадают в войд, они «взбираются на холм», теряют энергию — и, следовательно, их температура уменьшается. Когда фотоны покидают войд, они «скатываются с холма», восстанавливают энергию и их температура повышается. Если бы пространство не расширялось с ускорением, то температура восстанавливалась бы до начальной, которая была у фотонов при вхождении в войд. Но это не так.

Примерно два десятилетия назад ученые обнаружили, что Вселенная не просто расширяется, но расширяется с ускорением. Большинство космологов считают, что ускорение вызвано темной энергией, обладающей таким свойством, что в пространстве ее давление отрицательно и она противодействует силам гравитационного притяжения (на сверхбольших масштабах. — Примеч. пер.). Ускоренное расширение искажает рассмотренный выше сценарий катания шариков по холму. Применительно к фотонам реликтового излучения это означает, что, пока фотон пересекает войд, окружающая холм равнина становится выше и, таким образом, плоский берег на другой стороне войда тоже становится выше. В результате, выходя из войда, фотон не может вернуть себе всю энергию, затраченную на подъем. Таким образом, в результате прохождения через войд фотоны теряют энергию, что на карте анизотропии реликтового излучения выглядит как группа холодных пятен. При пересечении сверхскоплений галактик реликтовые фотоны, наоборот, набирают энергию, что представлено на карте анизотропии группой горячих пятен.

Та часть анизотропии, которая генерируется за счет интегрального эффекта Сакса — Вольфа, не слишком велика даже при пересечении фотонами больших войдов. Порядок анизотропии составляет величину порядка  $10^{-5}$  от изотропного фона. Однако в случае гигантской пустой области (сверхвойда) анизотропия должна быть достаточно большой для генерации холодного пятна. Найденный сверхвойд не только позволил бы объяснить природу холодного пятна на карте анизотропии реликтового излучения, но и стал бы еще одним наблюдательным тестом для темной энергии.

### Охота за гигантской пустотой

Поговорим о поисках сверхвойда, начатых в 2007 г. Вообще говоря, обнаружить в космическом пространстве огромную пустую область сложнее, чем кажется на первый взгляд. Большинство астрономических инструментов дают плоские снимки неба, которые не содержат информации о том, как далеко лежат объекты на снимках. Одни галактики выглядят

## Холодный одинокий энергетический холм в космосе

Ученые предположительно обнаружили сверхвойд — область пространства, в которой гораздо меньше галактик, чем в окружающих областях. Возможно, сверхвойд может объяснить странное холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения, открытое около десяти лет назад. Реликтовое излучение было рождено вскоре после Большого взрыва и до сих пор путешествует по Вселенной. Фотоны реликтового излучения, проходя через сверхвойд, могут терять энергию за счет так называемого интегрального эффекта Сакса — Вольфа.

Холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения

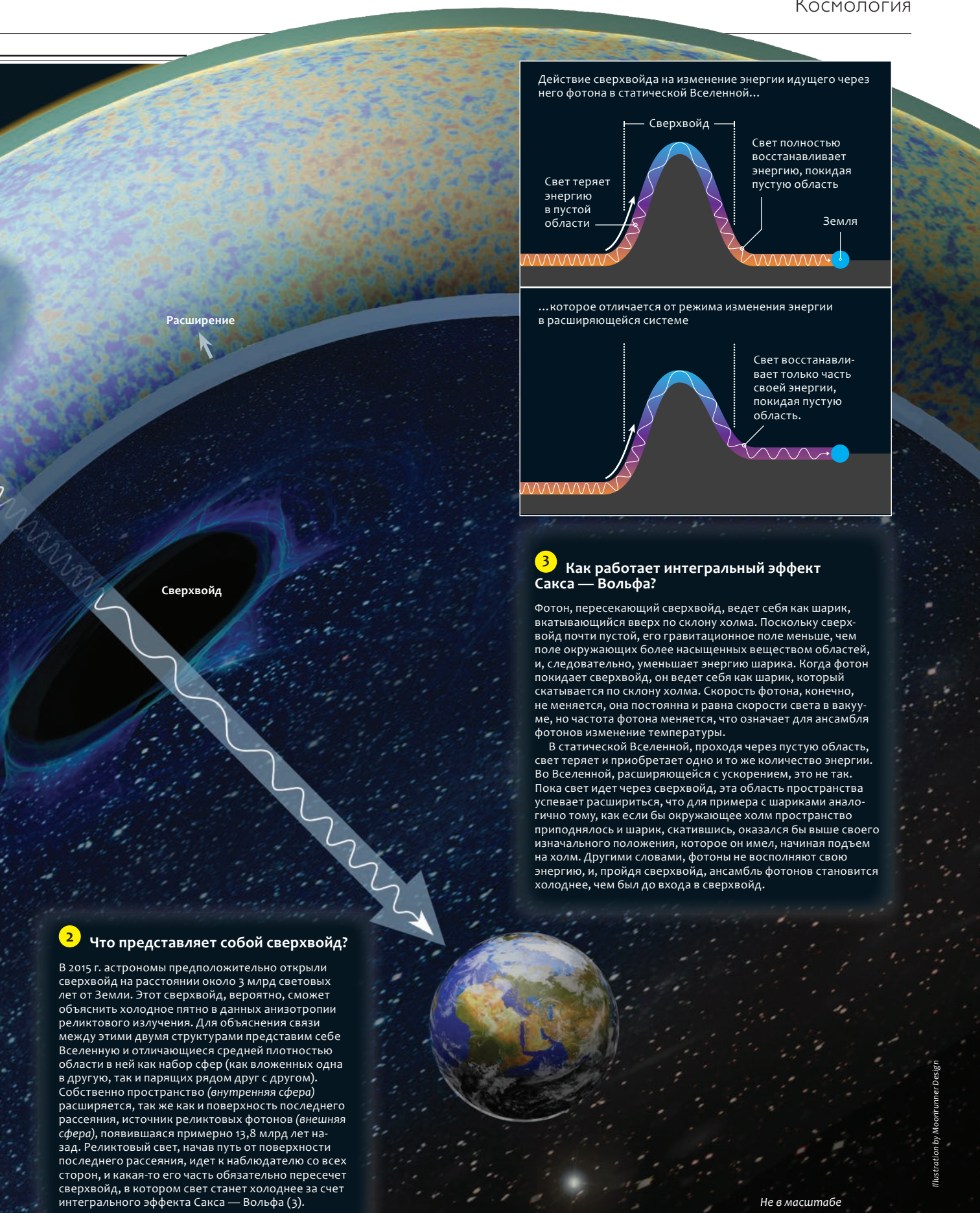
Расширение

### 1 Что такое холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения?

Реликтовое излучение — самый древний свет Вселенной, который распространяется по всему пространству. Двумерная карта анизотропии реликтового излучения представляет собой смену областей повышенной (красный) и пониженной (голубой) яркости с более высокой и более низкой температурой соответственно. В целом анизотропия реликтового излучения хорошо объясняется стандартной космологической моделью, однако есть и нерешенные вопросы, в частности наличие большого холодного пятна на этой карте (отмечено кружком), которое слишком холодно и слишком велико, чтобы быть легко объясненным. Проблема этого пятна волновала ученых с момента его открытия в 2004 г. космическим радиотелескопом WMAP.

Холодное пятно

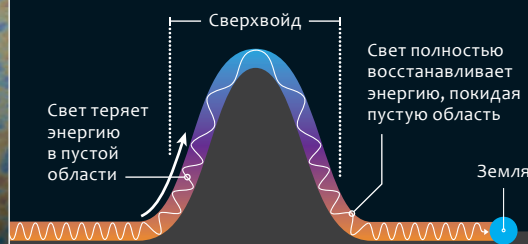




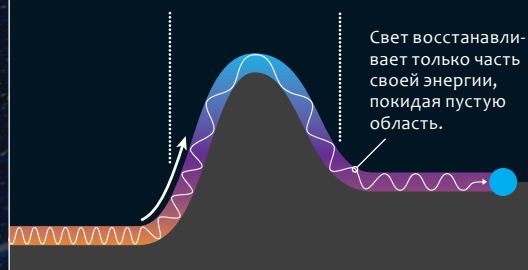
Расширение

Сверхвойд

Действие сверхвойда на изменение энергии идущего через него фотона в статической Вселенной...



... которое отличается от режима изменения энергии в расширяющейся системе



### 3 Как работает интегральный эффект Сакса — Вольфа?

Фотон, пересекающий сверхвойд, ведет себя как шарик, вкатывающийся вверх по склону холма. Поскольку сверхвойд почти пустой, его гравитационное поле меньше, чем поле окружающих более насыщенных веществом областей, и, следовательно, уменьшает энергию шарика. Когда фотон покидает сверхвойд, он ведет себя как шарик, который скатывается по склону холма. Скорость фотона, конечно, не меняется, она постоянна и равна скорости света в вакууме, но частота фотона меняется, что означает для ансамбля фотонов изменение температуры.

В статической Вселенной, проходя через пустую область, свет теряет и приобретает одно и то же количество энергии. Во Вселенной, расширяющейся с ускорением, это не так. Пока свет идет через сверхвойд, эта область пространства успевает расшириться, что для примера с шариками аналогично тому, как если бы окружающее холм пространство приподнялось и шарик, скатившись, оказался бы выше своего изначального положения, которое он имел, начиная подъем на холм. Другими словами, фотоны не восполняют свою энергию, и, пройдя сверхвойд, ансамбль фотонов становится холоднее, чем был до входа в сверхвойд.

### 2 Что представляет собой сверхвойд?

В 2015 г. астрономы предположительно открыли сверхвойд на расстоянии около 3 млрд световых лет от Земли. Этот сверхвойд, вероятно, сможет объяснить холодное пятно в данных анизотропии реликтового излучения. Для объяснения связи между этими двумя структурами представим себе Вселенную и отличающиеся средней плотностью области в ней как набор сфер (как вложенных одна в другую, так и парящих рядом друг с другом). Собственно пространство (*внутренняя сфера*) расширяется, так же как и поверхность последнего рассеяния, источник реликтовых фотонов (*внешняя сфера*), появившаяся примерно 13,8 млрд лет назад. Реликтовый свет, начав путь от поверхности последнего рассеяния, идет к наблюдателю со всех сторон, и какая-то его часть обязательно пересечет сверхвойд, в котором свет станет холоднее за счет интегрального эффекта Сакса — Вольфа (3).

Не в масштабе



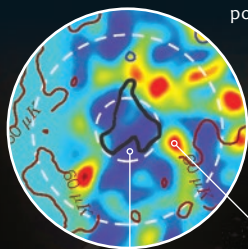
## МЕТОДОЛОГИЯ

## В поисках сверхвойда

Для поиска сверхвойда, который мог бы объяснить холодное пятно на карте анизотропии реликтового излучения, астрономы проанализировали каталог галактик, созданный космической миссией WISE — Глубокий инфракрасный обзор, а также с помощью двухмикронного Обзора всего неба (2MASS) и Pan-STARRS. В каталоге указаны положения большого числа галактик, однако не указаны расстояния до них, что необходимо для определения расстояния до сверхвойда. Для оценки расстояний до галактик использовались оптические данные в разных фильтрах для определения, насколько свет смещен в красную область электромагнитного спектра. Красное смещение далеких галактик вызвано ускоренным расширением Вселенной (длина волны света, испущенного источником в расширяющемся пространстве, также будет расширяться). Чем больше красное смещение галактики, тем дальше от Земли она находится. Совместно используя данные каталогов и оценки красных смещений (следовательно, и расстояний), ученые построили трехмерную карту распределения галактик в той части неба, где располагается холодное пятно.

### Срезы Вселенной

Исследователи разделили трехмерную плотность распределения галактик на ряд срезов, показывающих, как меняется плотность галактик с расстоянием до наблюдателя. В каждом срезе (слева) цвет указывает плотность, где красные области соответствуют более плотным областям, содержащим много галактик, а голубые области соответствуют областям с малым количеством галактик. Срезы центрированы так, чтобы оказаться на одном луче зрения с холодным пятном на карте анизотропии реликтового излучения. Белыми кругами показаны радиусы 5 и 15 градусов вокруг центра холодного пятна (для сравнения: площадь Луны покрывает полградуса на небе). Черным контуром показан профиль холодного пятна. Красными контурами показаны другие структуры на карте анизотропии.

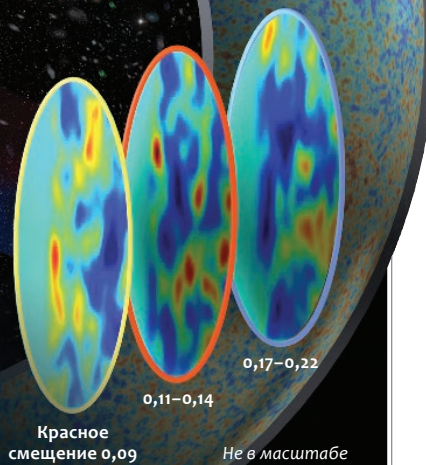


Пониженная плотность (голубой)

Повышенная плотность (красный)

### Набор для объемных изображений

Исследователи создали три среза Вселенной, чтобы показать плотность распределения галактик на трех разных расстояниях: с красным смещением 0,09 (это соответствует расстояниям до 1,24 млрд световых лет); с красным смещением в интервале от 0,11 до 0,14 (это соответствует расстояниям от 1,5 млрд световых лет до 1,9 млрд световых лет); с красным смещением в интервале от 0,17 до 0,22 (что соответствует расстояниям в интервале от 2,3 млрд световых лет до 3 млрд световых лет). Ближайший срез не показывает наличие пустоты, а самый дальний, похоже, показывает небольшой войд, немного смещенный от центра среза для соответствия положению холодного пятна. Средний срез показывает большую пустую область, большую частью совпадающую с положением холодного пятна. Так был отождествлен сверхвойд.



Красное смещение 0,09

0,11-0,14

0,17-0,22

Не в масштабе

как бы слипшимися между собой, а другие, наоборот, широко отстоящими относительно луча зрения, что не соответствует реальным физическим расстояниям между ними. Для того чтобы установить относительное расположение галактик в пространстве и оценить расстояние до них, астрономы должны собрать дополнительную информацию о каждой галактике в отдельности. Это довольно трудоемкая задача. В 2007 г. группа ученых из Университета Миннесоты — Лоуренс Рудник (Lawrence Rudnick) и его коллеги — исследовали каталог галактик в радиодиапазоне, полученный в проекте обзора неба NRAO VLA. Было обнаружено, что область пространства, примерно совпадающая по расположению с холодным пятном на карте анизотропии реликтового излучения, содержит малое число галактик по сравнению со средним числом галактик в окружающих областях. Очень большое расстояние до этих галактик было априори известно из данных других каталогов. Собрав всю информацию воедино, ученые предположили,

что данная область представляет собой сверхвойд, ответственный за генерацию холодного пятна согласно механизму интегрального эффекта Сакса — Вольфа, и находится от нас на расстоянии около 11 млрд световых лет. Одна из трудностей такого предположения заключается в том, что свет, приходящий к нам сегодня, пересекал бы этот сверхвойд очень давно, примерно 8 млрд лет назад (именно восемь, а не 11, потому что с момента прохождения света через этот сверхвойд Вселенная успела расширяться почти в два раза). В те далекие времена влияние темной энергии еще не было так велико, как сегодня, и поэтому, вполне возможно, интегральный эффект Сакса — Вольфа был совсем незначительным для того, чтобы получить холодное пятно.

Работа группы Рудника не дала результатов, однако инициировала дальнейшие исследования в этой области. Вместе с молодыми исследователями Гавайского университета Беном Гранеттом (Ben Granett) и Марком Нейринком (Mark Neyrinck)



мы взяли проверить, насколько часто положение структурных особенностей карты анизотропии (областей повышенной и пониженной температуры, но не так ярко выраженных, как холодное пятно) коррелирует с положениями скоплений галактик и с открытыми ранее небольшими войдами. Статистический анализ выявил, что такая корреляция встречается довольно часто. Хотя ни одна из исследованных структурных особенностей не в состоянии объяснить большое холодное пятно, однако наличие корреляций на более мелких масштабах побудило исследователей работать дальше.

Была составлена программа наблюдений для международного телескопа (Канада — Франция — Гавайи), в ходе которой было снято несколько небольших полей, совпадающих с положением холодного пятна, и посчитано количество галактик в них. Увы, никаких указаний на наличие сверхвойда в месте, предсказанном группой Рудника, обнаружено не было. Существование сверхвойда на расстояниях свыше 3 млрд световых лет было исключено, что подтвердилось отрицательными результатами группы Малколма Бремера (Malcolm Bremer) из Бристольского университета.

В то же время статистическая значимость предсказаний Рудника была заново вычислена и оказалась ниже, чем полагали раньше. Другими словами, встал вопрос о целесообразности попытки объяснения холодного пятна с помощью интегрального эффекта Сакса — Вольфа. Но нет худа без добра: была найдена подсказка, как можно искать сверхвойд совсем рядом с нами.

Как ни парадоксально это звучит, поиск гигантской области пустоты вблизи нас оказался сложнее. Дело в том, что чем дальше наблюдаемое поле, тем больше его реальный физический размер и, следовательно, тем аккуратнее нужно подсчитывать количество галактик в этом поле. Близко же к нам, в меньших объемах, статистическая значимость низка. Таким образом, вероятность того, что малое число близких галактик указывает на наличие сверхвойда, составляет 75%. Это не слишком высокая вероятность, чтобы утверждать что-то наверняка. Необходимо иметь участки неба гораздо большей площади, охватывающие в совокупности фактически все холодное пятно. Доступные телескопы не давали нужного охвата.

### Счастливый случай

Через несколько лет в наше распоряжение попали новые данные. В то время я распрощался со своими коллегами Гранеттом и Нейринком, с Гавайским астрономическим институтом и был занят работой над новым телескопом *PSI*, первой обсерваторией Обзорного панорамного телескопа и Системы быстрого реагирования (*Pan-STARRS*). Мы возлагали большие надежды на этот телескоп.

В обсерватории была установлена самая большая в мире камера с разрешением в 1,4 гигапикселя. Телескоп расположен на высоте около 3 км над уровнем моря на вулкане Халеакала на острове Мауи. В мае 2010 г. в ходе сотрудничества ряда университетов мы с коллегами начали картирование трех четвертей неба телескопом *PSI*. Мне припоминается разговор с Ником Кайзером (Nick Kaiser), который позже стал главой телескопа *PanSTARRS*, о том, что в первую очередь необходимо провести наблюдения области холодного пятна, — но, хотя положительного решения и не было принято, область холодного пятна попала в зону наблюдений, которые должны были вестись первые несколько лет. В ожидании данных, которые начали понемногу поступать, параллельно продолжались поиски сверхвойда в новых картах анизотропии реликтового излучения, полученных в результате работы космической миссии *Planck*, а также независимо по каталогам инфракрасных изображений галактик, полученных с помощью Глубокого инфракрасного обзора (*WISE*). Вместе со студентом Андрашем Ковачем (András Kovács) мы начали работу над этими данными. В частности, проводились поиски областей, содержащих небольшое число галактик, в каталоге *WISE* — и одна из найденных областей по расположению совпала с холодным пятном.

Ковач встречался со мной на Гавайях несколько раз. Летом я побывал в столице Венгрии, где Ковач учился в Университете им. Лоранда Этвеша. Кроме того, мы поддерживали ежедневные телестолы и вследствие 12-часовой задержки между Гонолулу и Будапештом наши диалоги часто продолжались далеко за полночь по европейскому времени. Во время одной из таких сессий я попросил Ковача поискать самую большую область низкой плотности галактик, другими словами, самый большой войд, в *WISE*-каталоге галактик. Спустя несколько дней Ковач прислал по электронной почте письмо с изображениями и координатами самых больших войдов каталога. Читая его сообщение, я сразу же понял, что положение одной из таких пустот совпало с областью холодного пятна на карте анизотропии реликтового излучения. До этого момента я не говорил Ковачу о своем поиске связей сверхвойда и холодного пятна, и открытие стало чрезвычайно воодушевляющим, потому что исследования Ковача оказались совершенно непредвзятыми — он не надеялся отыскать войд в определенной «желаемой» области. Поскольку все галактики *WISE*-каталога расположены в достаточной близости от нас, это было указанием на то, что сверхвойд, быть может, следует искать где-то рядом.

Открытие и первоначальные подсказки разделяли годы работы. Использовались данные *WISE*, *Pan-STARRS* и проекта двухмикронного Обзора всего неба (*2MASS*), но прежде всего нужно было определить расстояния до галактик. Один

из способов определения реального физического расстояния до некоторого объекта — измерить красное смещение этого объекта, то есть смещение электромагнитного спектра излучения в красную сторону. Чем дальше расположена галактика, тем быстрее она удаляется от нас и тем больше величина ее красного смещения. Несмотря на то что исследователи не могли измерить красное смещение интересующих их галактик, они смогли оценить его приблизительно, анализируя цвета галактик, сравнивая их с цветами галактик без красного смещения и используя разные цветные фильтры. Наконец в области холодного пятна все галактики были снабжены оценками расстояний, то есть была построена трехмерная карта этой области. Далее была сделана серия срезов — наборов плоских картинок, каждая из которых соответствовала некоторому расстоянию до наблюдателя. Первый набор изображений выглядел примерно как вертикальные ломтики яблока, в центре которого скрывался сверхвойд, который имел примерно сферическую форму. Оказывается, гигантская пустая область скрывалась совсем близко от нас, на расстоянии около 3 млрд световых лет, и именно поэтому ее было так трудно обнаружить. Исследование статистики данных показало, что существование сверхвойда подтверждается в подавляющем большинстве случаев. Другими словами, в месте расположения холодного пятна на карте анизотропии реликтового излучения с большой вероятностью существует огромная пустая область. Эта область действительно гигантская — ее поперечный размер составляет около 1,8 млрд световых лет. Возможно, это самая большая структура, найденная учеными в космосе. И область эта довольно редка — по оценкам, их должно быть всего несколько в пределах видимой Вселенной.

### О природе холодного пятна

Итак, по мнению отдельных исследователей, в том числе и автора этой статьи, искомый сверхвойд найден. Скопления галактик и войды галактических масштабов коррелируют с пятнами повышенной и пониженной яркости на карте анизотропии реликтового излучения. Предположительно найденный сверхвойд совпадает в своем положении с большим холодным пятном на карте анизотропии. Решена ли задача? Не совсем, даже при самых оптимистических ожиданиях. Даже такое пространственное совпадение не доказывает, что одно обуславливает другое. Возможно, что совпадение случайно. Вероятность случайности, по оценкам автора статьи, мала: частота события, что сверхвойд послужил причиной появления холодного пятна, в 20 тыс. раз больше, чем частота случайного совпадения их положений. Есть и еще проблема, гораздо более серьезная. Совпадения положений недостаточно, важен и размер

сверхвойда. Для того чтобы объяснить пониженную температуру холодного пятна относительно средней анизотропии, размер сверхвойда должен быть даже больше, чем это предварительно оценено, в два, а быть может даже в четыре раза. Неопределенность настолько велика, что многие космологи еще более уверенно приписывают случайности совпадение положений сверхвойда и холодного пятна. Звучат предложения искать другие объяснения, например с помощью имитации интегрального эффекта Сакса — Вольфа меньшим против ожидаемого излучением галактик. Кроме того, хотя, по моему мнению, наблюдения доказывают существование сверхвойда, все равно необходимо более точно определить его пространственную геометрию. Если, например, сверхвойд вытянут по направлению луча зрения или несколько меньших войдов в проекции имитируют один большой (конструкция типа снеговика), то происхождение холодного пятна становится объяснить легче.

Трудностей много. Необходимо больше данных, чтобы сказать что-то определенное. Уже планируются новые наблюдения на *PSI* полного неба, а не только начальной частичной области. Большее количество наблюдательных данных позволит уменьшить неопределенность результата.

Кроме того, большая статистика данных поможет выявить расхождения в наблюдениях и теории, которая предсказывает размеры и формы таких сверхвойдов. Это может оказаться очень интересным для проверки альтернативных теорий гравитации, которые расходятся с теорией относительности на сверхбольших масштабах, — с этой точки зрения сверхвойд представляет собой уникальный объект для исследования альтернативных гравитационных теорий.

В любом случае открытие такого не имеющего аналогов объекта, как гигантская область пустоты, поможет космологам лучше понять крупномасштабную структуру Вселенной, а также, возможно, прольет свет на нерешенную проблему состава темной энергии, предоставит шанс вскрыть глубинные свойства гравитации. В ближайшие годы планируются новые наблюдения и новые исследования сверхвойда для понимания мира, в котором мы живем. ■

Перевод: О.С. Сажина

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Старкман Г., Шварц Д. Хорошо ли настроена Вселенная? // ВМН, № 11, 2005.
- Detection of a Supervoid Aligned with the Cold Spot of the Cosmic Microwave Background. István Szapudi et al. in Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 450, No. 1, pages 288–294; June 11, 2015.





ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

# Научная Россия



Взгляд на науку  
с пристрастием

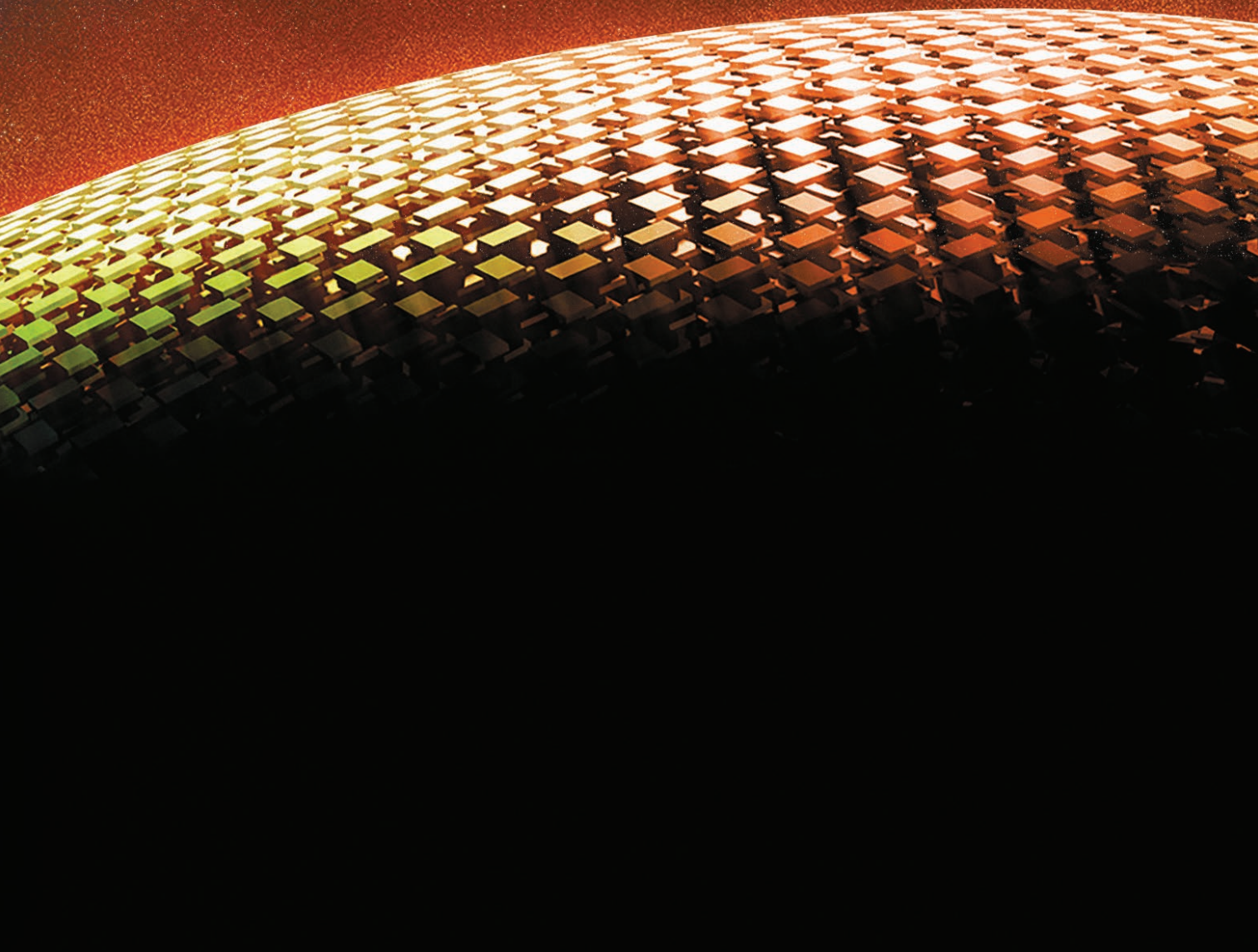
**Актуальная информация** о науке и технике в России и в мире  
**Открытия** в разных областях фундаментальной и прикладной науки  
**Новости** из научных центров и вузов страны и мира

[scientificrussia.ru](http://scientificrussia.ru)



# ЧЕРНЫ

В начале





# Е Д Ы Р Ы

## времен

КОСМОЛОГИЯ

Скрытая популяция черных дыр, родившаяся менее чем одну секунду спустя после Большого взрыва, могла бы разрешить загадку темной материи

Хуан Гарсиа-Бейидо и Себастьян Клесс

**Больше миллиарда лет тому назад** две черные дыры в удаленной части нашей Вселенной кружились по спирали друг около друга в смертельном танце и в конце концов слились воедино. Процесс был настолько грандиозен, что вызвал возмущения, рябь на ткани пространства-времени — гравитационные волны, которые начали распространяться со скоростью света по всей Вселенной. В сентябре 2015 г., пройдя более 1 млрд световых лет, эти гравитационные волны накатили на Землю и были зарегистрированы как краткий писк в датчиках обсерватории *LIGO*.

Это было первое прямое обнаружение гравитационных волн. Наблюдения подтвердили сделанное век назад предсказание Альберта Эйнштейна. Сигнал от слияния черных дыр — прародителей показал, что их массы превосходят солнечную в 30 раз. Другими словами, масса каждой из них в два-три раза больше, чем масса обычной черной дыры, родившейся в результате взрыва сверхновой. Эти черные дыры настолько тяжелы, что вообще трудно объяснить, как они могли бы образоваться в результате эволюции звезд. Кроме того, даже если две черные дыры и сформировались независимо при гибели двух сверхмассивных звезд, они должны

## ОБ АВТОРАХ

**Хуан Гарсиа-Бейидо** (Juan García-Bellido) — физик-теоретик, профессор Института теоретической физики в Мадриде. Область научных интересов — ранняя Вселенная, темная энергия, черные дыры и квантовая гравитация. Активный участник проекта поиска темной энергии (*Dark Energy Survey*) и член миссий «Евклид» и *LISA* (Лазерно-интерферометрическая космическая антенна) Европейского космического агентства.



**Себастьян Клесс** (Sébastien Clesse) — бельгийский космолог, работает в Рейнско-Вестфальском техническом университете Ахена. Сфера интересов: космологическая инфляция, модифицированная гравитация, первичные черные дыры. Активный член миссии «Евклид» и сотрудник сообщества телескопа *SKA* (Квадратная километровая решетка).



были бы найти друг друга и слиться в единый объект, что представляется чрезвычайно маловероятным событием на временном промежутке существования нашей Вселенной. Принимая во внимание вышесказанное, резонно предположить, что эти две черные дыры сформировались каким-то другим путем, более экзотическим, совсем не связанным со звездами.

Зарегистрировав гравитационные волны, *LIGO*, быть может, совершила и еще одно не менее удивительное открытие: были обнаружены черные дыры, которые предшествовали рождению звезд. Несмотря на то что такие «первичные» черные дыры раньше никогда не наблюдались, существуют теоретические модели, согласно которым подобные объекты могли бы образовываться в очень больших количествах из горячей плотной плазмы, заполнявшей Вселенную менее чем секунду спустя после Большого взрыва. Скрытая популяция этих объектов смогла бы прояснить некоторые нерешенные загадки современной космологии. В частности, первичные черные дыры могут представлять собой некоторую, а быть может даже значительную часть темной материи — почти 85% невидимого вещества (речь идет о проценте невидимого вещества относительно всего вещества во Вселенной; темная материя составляет около 22% массы Вселенной, звезды и другие объекты — 0,4%, межгалактический газ — 3,6%. — Примеч.

пер.), действующего как «гравитационный клей» для удержания галактик и их скоплений в виде связанных структур. Дальнейшие исследования с помощью *LIGO* и других инструментов смогут в ближайшее время проверить эти теоретические модели, очень многообещающие и революционные в нашем понимании устройства Вселенной.

## Упадок «мачо», расцвет вимпов

На первый взгляд, черные дыры могут показаться идеальными кандидатами на роль темной материи, потому что они не излучают. Действительно, наряду с другими объектами, такими как планеты и коричневые карлики, черные дыры предоставляют давнее решение проблемы темной материи — *MACHO* (*massive compact halo objects* — «массивные компактные объекты в гало (галактик)»). Найденные как в сферических галактических гало, которые окружают каждую галактику, так и вблизи центров яркости галактик, «мачо» могли бы создавать гравитационное притяжение, ответственное за некоторое аномальное движение звезд и газа, которые астрономы наблюдают на периферии галактик. Иначе говоря, кажущееся вращение галактик слишком быстрое, чтобы объяснить его одной только светящейся материей, сосредоточенной в звездах. Темное вещество обеспечивает дополнительное гравитационное притяжение для того, чтобы удерживать звезды в галактике.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Природа темной материи — невидимого вещества, которое своим гравитационным полем удерживает галактики вместе, — большая космическая тайна.
- Многие исследователи предполагают, что темная материя состоит из слабо взаимодействующих массивных частиц (вимпов), и ищут их в экспериментах. Однако до настоящего момента они не были обнаружены.
- Первичные черные дыры могли сформироваться почти сразу же после Большого взрыва. Это альтернативные кандидаты на роль темной материи. Однако и они до сих пор ускользали от обнаружения.
- Больше доказательств существования первичных черных дыр может появиться в данных гравитационно-волновых детекторов и других обсерваторий. Если существование таких объектов будет подтверждено, они смогут раскрыть загадку темной материи, а также и другие космологические проблемы.



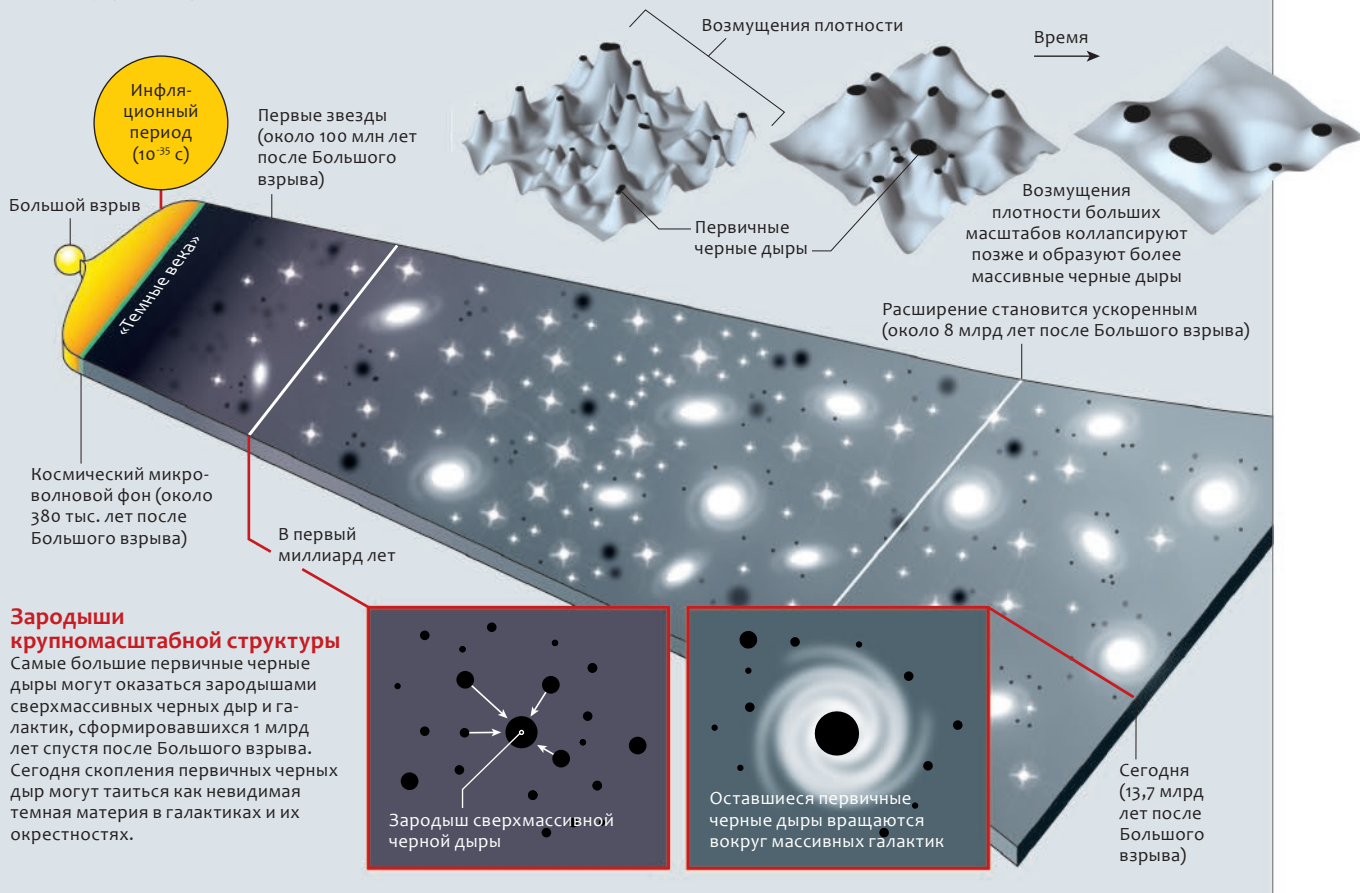
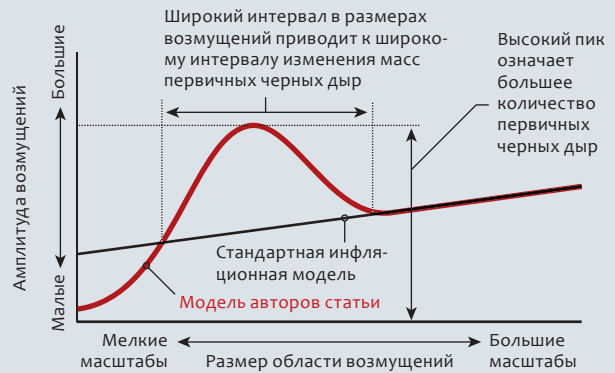
## Черные дыры, рожденные Большим взрывом

Первые во Вселенной черные дыры могли родиться в самые ранние моменты космического времени, когда все вокруг представляло собой кипучую густую смесь элементарных частиц. В 1970 г. теоретики предположили, что плотные области в ранней Вселенной могут коллапсировать под действием собственных гравитационных сил практически через секунду

### Первичные черные дыры формируются в скоплениях

Инфляция — предлагаемая модель ускоренного расширения Вселенной меньше чем через секунду после Большого взрыва — может породить первичные черные дыры путем усиления квантовых возмущений до огромных размеров. С окончанием инфляционной стадии расширения Вселенной эти возмущения могут породить возмущения плотности, которые в свою очередь породят первичные черные дыры. Более крупные и мощные флуктуации смогут породить более массивные и многочисленные первичные черные дыры. Модификация инфляционной модели, предложенная авторами, предсказывает широкий пик в спектре усиленных возмущений, а также спектр возмущений плотности, которые порождают первичными черными дырами в скоплениях. Массы первичных черных дыр меняются в пределах от 100 до 10 тыс. масс Солнца. Через 1,5 млн лет после Большого взрыва скопление может охватить уже сотни световых лет площади и содержать миллионы первичных черных дыр. Эти объекты сливаются, и продукты их взаимодействия — обычные газ и пыль — управляют ростом галактик и скоплений галактик.

после Большого взрыва, формируя так называемые первичные черные дыры, которые могут в дальнейшем задавать структуру эволюционирующей расширяющейся Вселенной. Не излучая, первичные черные дыры могут оказаться хорошими кандидатами на роль темной материи, поскольку их трудно заметить наблюдательными методами.



Если «мачо» составляют большую часть темной материи во Вселенной, то они должны объяснять и другие наблюдения. Вне зависимости от того, из чего состоит темная материя, она формирует крупнейшие структуры во Вселенной, определяя происхождение и рост не только галактик,

но и скоплений и сверхскоплений галактик. Эти объекты возникают из-за гравитационного коллапса сгустков газа внутри гало из темной материи. Космологи смогли точно определить пространственное расположение таких сгустков с помощью глубоких и широких галактических

обзоров, сопоставляя их с колебаниями температуры микроволнового реликтового излучения («послесвечение» Вселенной после Большого взрыва).

Распределение темной материи в больших галактиках и скоплениях галактик искривляет пространство. Траектории лучей света, которые испущены фоновыми по отношению к этим галактикам источниками, искривляются, искажая изображения этих источников. Этот эффект известен как гравитационное линзирование.

Гипотеза «мачо», однако, испытала ряд трудностей десятилетие назад, когда не подтвердилась в косвенных наблюдениях. Так, астрономы искали «мачо» с помощью эффекта микролинзирования — вида гравитационного линзирования, при котором некое массивное тело (коричневый карлик, черная дыра или, быть может, даже планета) проходит между наблюдателем и звездой, временно изменяя блеск последней. Несколько многолетних обзоров по исследованию эффекта микролинзирования для миллионов звезд в Большом и Малом Магеллановых Облаках, главных галактиках — спутниках нашего Млечного Пути, не показали того, что объекты «мачо» составляют большую часть галактического гало. Эти результаты были достаточно убедительны, чтобы исключить «мачо» с массами до десяти солнечных масс как основных кандидатов в темную материю. С получением результатов этих наблюдений теоретики сформулировали альтернативную гипотезу кандидатов в темную материю — так называемые вимпы (*WIMP*, *weakly interacting massive particles* — «слабо взаимодействующие массивные частицы»).

Вимпы предсказываются некоторыми теориями — расширениями стандартной модели физики частиц, однако их статус до сих пор так же ненадежен, как и у «мачо». Несмотря на десятилетия поисков на ускорителях, подземных детекторах и космических телескопах, на сегодня нет никаких подтверждений существования вимпов. Поскольку нулевые результаты не могли не отразиться на жизнеспособности вимпов, некоторые исследователи начали пересматривать гипотезу «мачо», акцентируясь, в частности, на первичных черных дырах. Однако возникает вопрос: какие процессы смогли бы распространить эти странные объекты в наблюдаемой Вселенной и как они могли так долго ускользать из поля зрения наблюдателей?

## Состоит ли темная материя из первичных черных дыр?

Нижеперечисленные наблюдения указывают на различия

### 1. Дополнительное обнаружение гравитационных волн

Гравитационно-волновые детекторы, такие как улучшенная лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория LIGO в США и улучшенный интерферометр Virgo в Италии, смогут обнаружить большее количество событий слияния черных дыр. Обнаружение неожиданно большого количества таких событий будет указывать на правильность предположения об их раннем происхождении. Однако такие наблюдения не смогут доказать, что темная материя состоит из первичных черных дыр. Такое доказательство следует вывести из совокупности независимых наблюдений, сделанных разными методами. В конечном итоге обнаружение черной дыры с массой меньше так называемого предела Чандрасекара (1,45 масс Солнца), ниже которого звезды не могут превращаться в черные дыры, будет неоспоримым доказательством их первичного происхождения. К счастью, LIGO может скоро достичь необходимой чувствительности для обнаружения таких черных дыр, если их компаньон окажется более массивным (больше десяти солнечных масс). Наконец, на космологических шкалах обилие двойных черных дыр должно порождать гравитационно-волновой фон, который можно обнаружить с помощью будущего космического лазерного интерферометра LISA и с помощью наземных инструментов по таймингу пульсаров.

### 2. Открытие большего числа сверхслабых карликовых галактик

В 2015 г. астрономы, используя данные, полученные в результате работы проекта по поиску темной энергии (*Dark Energy Survey*), открыли десятки сверхслабых карликовых галактик в галактическом гало. Это открытие имеет следствием, что сотни таких галактик, содержащих темную материю, должны быть спутниками Млечного Пути. Если темная материя состоит из первичных черных дыр, то большинство их должны находиться в карликовых галактиках, значительное количество которых могло бы быть обнаружено будущими космическими инструментами, например миссией «Евклид» Европейского космического агентства и Инфракрасным телескопом глубокого обзора NASA (*WFIRST*).

### 3. Измерения изменений в положении звезд

Миссия GAIA, еще один проект ЕКА, измеряет положения и скорости около 1 млрд звезд в Млечном Пути с беспрецедентной точностью. Эти измерения могут выявить множество изолированных массивных черных дыр по очень малым изменениям в движении звезд, оказавшихся поблизости от них.

### 4. Создание карт распространения нейтрального водорода в космосе

До и во время формирования первых звезд Вселенная состояла преимущественно из нейтрального водорода, который испускает характерное излучение на радиоволне 21 см. Уже в 2020 г. проект SKA, самый большой из когда-либо созданных в мире радиотелескопов, начнет составление карты всего неба на этой радиоволне. Аккреция вещества на первичные черные дыры порождает интенсивное рентгеновское излучение, ионизирующее окружающий нейтральный водород и дающее характерный сигнал на фоне карты, сделанной на длине волны 21 см. Телескоп SKA должен обнаружить массивные первичные черные дыры, если они составляют темную материю.

### 5. Изучение анизотропии микроволнового реликтового излучения

Рентгеновские лучи от первичных черных дыр, образующиеся за счет аккреции газа и пыли на эти объекты, должны также порождать искажения в спектре микроволнового фонового излучения. Важность этого эффекта до сих пор считается спорной, в частности в моделях первичных черных дыр, группирующихся в плотные скопления. Тем не менее в проекте NASA по исследованию первичной инфляции (PIXIE) предлагается методика измерений таких возможных искажений, что позволит ввести жесткое ограничение разнообразия моделей, рассматривающих первичные черные дыры как кандидатов на роль темной материи.



### Черные дыры от Большого взрыва

Физики Бернард Карр (Bernard Carr) и Стивен Хокинг предложили концепцию первичных черных дыр в 1970 г., хотя они рассматривали только объекты с небольшими массами, меньше массы горы. Такие крошечные черные дыры могли бы испариться и исчезнуть за время существования Вселенной. Причина испарения — квантово-механический процесс, теоретически сформулированный Хокингом, который носит название «излучение Хокинга» (в рамках модифицированной теории гравитации существуют модели неполного испарения черных дыр. — Примеч. пер.). На основании гипотезы полного испарения первичных черных дыр Карр и Хокинг сделали вывод о незначительности вклада таких маленьких черных дыр в общую массу темной материи.

Вероятность того, что массивные первичные черные дыры могут составлять большую, если даже не всю, часть темной материи, зависит от того, как именно происходил процесс космологического инфляционного расширения ранней Вселенной. Идея экспоненциального расширения Вселенной была впервые предложена физиком Аланом Гутом в 80-е гг. прошлого века. Инфляция — это гипотетическая фаза стремительного расширения сразу после Большого взрыва. За промежутки времени в  $10^{-35}$  с две точки, разделенные расстоянием меньше радиуса атома, разлетаются на четыре световых года друг от друга — расстояние, сравнимое с расстоянием от нас до ближайших звезд. Кроме того, во время инфляции крошечные квантовые флуктуации увеличиваются до макроскопических размеров за счет быстрого расширения, наполняя растущую Вселенную областями пониженной и повышенной плотности вещества и энергии, из которых позже образовалась крупномасштабная структура. Как ни удивительно, теория инфляции хорошо подтверждается наблюдениями этих самых возмущений плотности в анизотропии микроволнового реликтового излучения. В 1996 г. один из авторов этой статьи (Хуан Гарсиа-Бейидо) совместно с Андреем Линде из Стэнфордского университета и с Дэвидом Вандсом (David Wands) из Портсмутского университета в Великобритании в рамках теории инфляции предложили механизм формирования острых пиков в спектре возмущений плотности ранней Вселенной. Другими словами, ученые показали, как квантовые флуктуации, многократно усиленные инфляционным расширением, могут естественным образом породить достаточно плотные области, которые, коллапсируя, способны, в свою очередь, образовывать популяции черных дыр всего лишь через 1 с после завершения инфляции. Такие черные дыры и могут вести себя как темная материя, в своей совокупности превышая массу обычной барионной материи современной Вселенной.

В рассматриваемой модели все черные дыры популяции рождаются с одинаковой массой, которая определяется количеством энергии внутри коллапсирующей области. Идея образования таких черных дыр была подхвачена другими учеными, которые использовали ее для других инфляционных сценариев. Так, в 2015 г. Гарсиа-Бейидо и Себастьян Клесс предложили модель, схожую с первоначальным вариантом 1996 г., в которой первичные возмущения порождают первичные черные дыры с широким диапазоном масс. Это было достигнуто за счет того, что первичные возмущения в такой модели обладают широкими пиками в плотности распределения энергии, а также в пространственных объемах. Ключевое следствие этого сценария — тот факт, что большие возмущения плотности коллапсируют в непосредственной пространственной близости друг от друга, порождая скопления черных дыр с разными массами, превышающими массу Солнца на величину от 100 до 10 тыс. раз. В течение 1,5 млн лет после Большого взрыва каждая растущая и эволюционирующая область могла бы содержать миллионы первичных черных дыр в объеме всего нескольких сотен световых лет в поперечнике.

Такие скопления первичных черных дыр были бы достаточно плотными, чтобы объяснить наблюдаемое *LIGO* таинственное слияние черных дыр — событие, не отличающееся регулярностью. Время от времени траектории двух первичных черных дыр, принадлежащих единому скоплению, могут пересекаться. Таким образом, два объекта становятся гравитационно связанными и начинают приближаться друг к другу по спирали. Это движение продолжается миллионы лет, и пока черные дыры не сольются, идет излучение гравитационных волн. В январе 2015 г. авторами статьи было фактически предсказано, что *LIGO* обнаружит гравитационные волны от слияния таких массивных объектов — именно такие, какие были зафиксированы *LIGO* в этом году. Прогнозы авторов относительно числа подобных событий хорошо укладываются в пределы, установленные *LIGO*. Так, если в последующие годы *LIGO* и другие подобные эксперименты зарегистрируют гораздо больше событий слияния первичных черных дыр, то окажется возможным определить спектр масс и скорости вращения этих родоначальников черных дыр. Такой статистический анализ событий слияния черных дыр предоставил бы критическую информацию для проверки гипотез происхождения этих объектов. Главное достоинство рассматриваемого сценария в том, что он не опирается на ограничения по объектам «мачо», ранее установленные по данным гравитационного микролинзирования. Напомним, что эти ограничения исключают черные дыры с массами до десяти масс Солнца как основных кандидатов на роль темной

материи. Если первичные черные дыры существуют и обладают широким спектром масс, то только их малая часть может оказаться видимой в экспериментах по микролинзированию, а большая часть в таких экспериментах себя не проявит.

Если первичные черные дыры группируются в скопления, то вероятность того, что такое скопление окажется в луче видимости с наблюдаемой в рамках проекта гравитационного микролинзирования звездой из нашей галактики-спутника, составляет меньше одной тысячной. Можно искать события микролинзирования повсюду на небе, выискивая усиление блеска звезд в окрестностях Млечного Пути — в галактике Андромеда, или даже усиление блеска квазаров в очень далеких галактиках. Таким образом, в поисках «мачо» — первичных черных дыр — можно будет исследовать гораздо больший объем галактических гало. Последние наблюдения показывают, что хотя «мачо» с массами до десяти масс Солнца и не могут полностью составить среднее галактическое гало, но «мачо» с массами в диапазоне от одной десятой до нескольких масс Солнца легко могут обеспечить около 20% массы типичного гало галактики. Это значение согласуется с предложенным авторами статьи сценарием образования первичных черных дыр с широким диапазоном масс. Проще говоря, пока нельзя исключить возможность того, что темная материя преимущественно состоит из первичных черных дыр. Действительно, предложенный сценарий смог бы расшифровать другие космические тайны, связанные с темной материей и формированием галактик.

### Много проблем, одно решение

Скопления первичных черных дыр способны объяснить так называемую проблему малого количества галактик-спутников. Проблема заключается в отсутствии карликовых галактик-спутников, которые должны формироваться вокруг таких массивных галактик, как наш Млечный Путь. Современное моделирование распределения темной материи в космосе с точностью воспроизводит крупномасштабную структуру Вселенной. В этой структуре гало темной материи вытягивают скопления галактик в длинные «нити» посреди гигантских пустых областей (войдов) более низкой плотности. Однако в более мелких масштабах моделирование предсказывает существование большого количества менее крупных гало (субгало) темной материи, которые вращаются вокруг массивных галактик. Каждое из таких субгало может служить зародышем карликовой галактики, и сотни таких галактик должны окружать Млечный Путь. Астрономы обнаружили их, но гораздо меньше, чем прогнозировалось. Существует множество возможных объяснений отсутствия галактик-спутников, в том числе такое, что моделирование

не позволяет полностью учесть влияние обычной материи (водорода и гелия в звездах) на формирование галактик и на поведение предсказываемых карликовых галактик.

Согласно сценарию, предложенному авторами статьи, если скопления первичных черных дыр создают большую часть темной материи, то эти скопления должны доминировать в субгало, окружающих Млечный Путь, поглощая часть барионного вещества и сокращая звездообразование в этих субгало. Более того, даже если в этих субгало происходит активное звездоформирование, то эти звезды могут быть легко вытолкнуты при взаимодействии с первичными черными дырами. Оба эффекта могут существенно сократить светимость галактик-спутников, сделав их наблюдение затруднительным без наличия высококонтрастных камер глубокого обзора. К счастью, такие камеры теперь существуют, и астрономы уже использовали их в открытии десятков сверхслабых карликовых галактик вокруг Млечного Пути. По всей видимости, эти объекты вмещают в себя в сотни раз больше темной материи, чем светящиеся звезды, и, согласно модели авторов статьи, тысячи таких галактик должны вращаться вокруг Млечного Пути. Моделирование тоже предсказывает существование популяции галактик, промежуточных по размерам между карликовыми и массивными галактиками. Считалось, что такие объекты слишком велики и должны быть наблюдаемы, потому что в них легко и в достаточно большом количестве образуются звезды. Однако они не проявили себя в наблюдениях окрестностей нашей Галактики. Эта проблема «слишком велик, чтобы спрятаться» имеет решение, схожее с проблемой отсутствия галактик-спутников. Дело в том, что массивные первичные черные дыры, находящиеся в центрах галактик промежуточных масс, могли бы выбрасывать звезды и звездообразующий газ из этих объектов, делая их, таким образом, практически невидимыми для большинства наблюдений.

Первичные черные дыры могут также решить проблему происхождения сверхмассивных черных дыр. Эти монстры, весящие от миллиона до миллиарда солнечных масс, наблюдаются в центрах квазаров и массивных галактик очень рано в истории Вселенной. Если сверхмассивные черные дыры сформировались и выросли в результате гравитационного коллапса ранних звезд во Вселенной, то они никогда бы не достигли таких гигантских масс за такой короткий срок — менее 1 млрд лет после Большого взрыва.

В рассматриваемой модели, хотя большинство первичных черных дыр обладают массами только в несколько десятков солнечных, очень небольшая часть будет намного тяжелее, от сотен до десятков тысяч солнечных масс. Рожденные



меньше чем через секунду после Большого взрыва, эти чудовищные объекты могли бы действовать как гигантские зародыши для формирования первых галактик и квазаров, превратившись потом в сверхмассивные черные дыры в центрах галактик. Эти зародыши могли бы объяснить существование черных дыр и промежуточных масс от 1 тыс. до 1 млн солнечных масс. Такие черные дыры наблюдаются на орбитах вокруг сверхмассивных черных дыр и в центрах шаровых звездных скоплений. Другими словами, первичные черные дыры могут послужить недостающим звеном между обычными черными дырами звездных масс и сверхмассивными черными дырами. Быстро появились и наблюдательные указания на справедливость такого сценария: недавно обнаруженные неожиданно обильные источники рентгеновского излучения в ранней Вселенной легче всего объяснить с помощью большого числа первичных черных дыр, вырабатывающих рентгеновское излучение при аккреции на них газа менее чем через 1 млрд лет после Большого взрыва.

### Постигая мрак

Даже если массивные первичные черные дыры смогли бы дать ответ на загадку темной материи, а также некоторые другие давние проблемы космологии, вопрос о темной материи еще не закрыт. Возможны и другие объяснения, допустимы и другие модели — будущие наблюдения помогут отобрать наилучшие. Действительно, в ближайшие годы несколько наблюдательных программ должны проверить сценарий первичных черных дыр. Эти программы включают в себя поиски сверхслабых карликовых галактик, исследование влияния массивных первичных черных дыр на положения звезд в нашей Галактике, построение карт нейтрального водорода в первую эпоху звездообразования, а также изучение анизотропии микроволнового реликтового излучения.

Помимо этих экспериментов, ученые теперь обладают совершенно новым инструментом для открытия тайн Вселенной — это усовершенствованный проект *LIGO* и другие гравитационно-волновые детекторы (в том числе новейшая китайско-российская космическая миссия *TianQin* («Небесная лира»), предназначенная для поиска гравитационных волн на миллигерцах; миссия представляет собой систему трех спутников на геосинхронных орбитах, работающих по принципу лазерного интерферометра. — Примеч. пер.).

Если обсерватория *LIGO* действительно обнаружила сливающиеся компоненты скрытой группы массивных первичных черных дыр, то ученые ожидают открытия большого количества подобных событий в ближайшие годы. В июне 2016 г. сотрудники усовершенствованного проекта *LIGO* представили общественности результаты второго

детектирования гравитационных волн, испущенных двумя сливающимися черными дырами с массами 14 и восемь солнечных масс, а также было дано предварительное сообщение о другом предположительном событии слияния черных дыр массами 23 и 13 солнечных масс. Когда авторы завершали работу над этой статьей, было предварительно заявлено уже о шести событиях слияния. Все это служит указанием на то, что двойные черные дыры оказываются гораздо более частыми объектами в космосе, чем это ожидалось, и что они обладают широким спектром масс, что согласуется с обсуждаемым сценарием массивных первичных черных дыр. Принимая во внимание новые эксперименты и наблюдения, можно говорить о предварительном подтверждении существования первичных черных дыр и их ответственности за темную материю во Вселенной. Скоро мы перестанем блуждать в темноте относительно вопроса о темной материи. ■

Перевод: О.С. Сажина

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Добреску Б., Линкольн Д. Нераскрытые тайны скрытого космоса // ВМН, № 12, 2015.
- Постнов К.А., Долгов А.Д. Шаровые скопления, образованные популяцией первичных черных дыр. 08.04.2017. arXiv.org: 1702.07621v2
- Black Hole Relics in String Gravity: Last Stages of Hawking Evaporation. S. Alexeyev, A. Barrau, G. Boudoul, O. Khovanskaya (Sazhina), M. Sazhin in *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 19, pages 4431–4444, 2002.
- TianQin: a Space-Borne Gravitational Wave Detector. Jun Luo et al. in *Classical and Quantum Gravity*, Vol.33, No. 3, 2016.
- Density Perturbations and Black Hole Formation in Hybrid Inflation. Juan García-Bellido, Andrei Linde and David Wands in *Physical Review D*, Vol. 54, No. 10, pages 6040–6058; November 15, 1996.
- Massive Primordial Black Holes from Hybrid Inflation as Dark Matter and the Seeds of Galaxies. Sébastien Clesse and Juan García-Bellido in *Physical Review D*, Vol. 92, No. 2, Article No. 023524; July 15, 2015.
- Did LIGO Detect Dark Matter? Simeon Bird et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 116, No. 20, Article No. 201301; May 20, 2016.
- LIGO Gravitational Wave Detection, Primordial Black Holes, and the Near-IR Cosmic Infrared Background Anisotropies. A. Kashlinsky in *Astrophysical Journal Letters*, Vol. 823, No. 2, Article No. L25; June 1, 2016.
- The Clustering of Massive Primordial Black Holes as Dark Matter: Measuring Their Mass Distribution with Advanced LIGO. Sébastien Clesse and Juan García-Bellido in *Physics of the Dark Universe*, Vol. 15, pages 142–147; March 2017.

# ПЕРВЫЙ СРЕДИ ПЕРВЫХ



*Советский Союз запустил первый в мировой истории искусственный спутник Земли. А МГУ первым среди университетов нашей страны запустил собственный спутник. В чем необходимость университетской космической программы? Не дублирует ли она государственную программу исследования космоса? В чем ее особенность? Эти и другие вопросы мы сегодня адресуем ректору Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова академику **Виктору Антоновичу Садовничему***



## Татьянин день

— Виктор Антонович, хотелось бы начать с небольшого экскурса в историю. Ваш университет первым среди российских вузов запустил собственный спутник. Как это случилось? И с чего вообще началась космическая программа МГУ?

— Наши работы по освоению космоса начались, когда уже на втором в России искусственном спутнике стоял прибор Московского университета. Нас в те годы больше всего интересовала радиация. Тогда была эпоха, когда американские ученые и мы пытались понять природу радиации и того, что происходит в ближнем космосе. В результате наши спутники, начиная со второго, оснащенные приборами МГУ, открыли так называемый внешний пояс радиации и изучали его вместе с внутренним. Наша Земля окружена очень мощными поясами. И, конечно, здесь было научное соревнование с американскими учеными, и нами было сделано колоссальное открытие. За эту работу тогда ученым Московского университета была присуждена высшая научная награда — Ленинская премия. Я также не могу не упомянуть академика Сергея Николаевича Вернова, директора Института ядерной физики МГУ, который эти программы возглавлял, а также профессора Александра Евгеньевича Чудакова и других — это была выдающаяся страница в истории освоения космического пространства.

Затем МГУ систематически участвовал в изготовлении приборов и снабжал ими спутники, космические станции, ракеты. До эпохи запуска наших спутников 400 приборов Московского университета уже было установлено нами на различных спутниках и станциях, запускаемых у нас в стране. Мы изучали проблему радиации, но не менее интересна и проблема космических лучей, космических потоков элементарных частиц. И здесь перед нами открывается необъятное поле, причем во многом природа этих излучений, этих космических лучей неизвестна. Мы сейчас более подвержены именно таким природным атакам, и максимальный интерес у нас вызывают частицы, которые разгоняются определенными ускорителями в других галактиках, попадают в нашу и взаимодействуют с нашими частицами, которые далее разгоняются ускорителями нашей галактики. Сам процесс взаимодействия представляет очень большой интерес. Дальнейшие усилия были направлены на изучение магнитных полей и этих потоков в атмосфере, гамма-всплесков, транзиентных свечений и других явлений.

— **Чем конкретно занимались ваши спутники?**

— К моменту запуска нашей «Татьяны» мы отчетливо понимали, что освоение космического пространства представляет не только научный, но и образовательный интерес. Нам хотелось, чтобы информация, сбрасываемая нашими спутниками, использовалась в учебной работе, при подготовке дипломных и аспирантских работ, чтобы молодые ученые были причастны к космической программе МГУ. Накануне нашего юбилея, 250-летия Московского университета, мы сделали первый спутник и назвали его в честь нашего дня рождения — Татьянина



## ! Справка

**Виктор Антонович Садовничий** — ректор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Родился в селе Краснопавловке Харьковской области. После окончания аспирантуры работал в МГУ ассистентом, доцентом, профессором, заместителем декана механико-математического факультета по научной работе, заведующим кафедрой функционального анализа и его приложений факультета вычислительной математики и кибернетики, заведующим кафедрой математического анализа механико-математического факультета. Доктор физико-математических наук (1974), профессор (1975). С 1997 г. — действительный член РАН по отделению математических наук, секция прикладной математики и информатики. Подготовил более 65 кандидатов и 15 докторов наук. Автор более 500 научных работ, в том числе 60 монографий и учебников.

дня. На спутнике «Татьяна» были установлены приборы, которые изучали радиационные поля и излучения различной природы. Большой интерес у нас вызвали явления, которые происходят на высотах 100–400 км. Это кратковременные вспышки, которые американцы называли спрайтами. Они направлены от Земли в космос и обладают огромной мощностью: их можно условно сравнить со взрывами атомной бомбы, и они могут быть опасными для дальнейшего освоения космического пространства.

— **То есть они каким-то образом угрожают нашим космическим аппаратам?**

— Да, как раз одна из задач — понять их природу и изучить опасность, которую они в себе таят, отсюда необходимость тщательного исследования этого явления. Мы



Первый спутник МГУ «Татьяна», 2005 г.

должны понять их природу, их группировку. Наши аппараты увидели, что основная группировка сильных разрядов располагается вдоль экватора. Второй наш спутник показал, что более слабые разряды распределены равномерно над водой, и это доказывает, что они имеют не грозовой характер, т.е. не связаны с природой полярного сияния. Это нечто совершенно другой природы, которая пока не изучена и не понятна. Значит, ее нужно изучать, тогда мы сумеем эти вспышки обходить или, быть может, даже управлять ими. Почему бы и нет? Это же электромагнитные излучения, которые теоретически могут быть управляемыми. Как раз «Татьяна» и занималась изучением их распределения и группировки, помимо фиксации потоков космических частиц, радиации, материаловедения. Мы последовательно изучаем влияние пребывания в космосе на приборы, на элементную базу, на материалы. Это целая область науки — как радиация влияет на продолжительность полета, на приборы в космосе.

**— Проявляли ли зарубежные страны интерес к вашим проектам?**

— «Татьяна-1» привлекла внимание американских и китайских ученых. Затем с космодрома «Байконур» была запущена «Татьяна-2». Она продолжала более глубоко изучать те же явления, что и «Татьяна-1», и здесь мы придавали значение сотрудничеству с Женским университетом Ивха, одним из ведущих в Корее. Коллеги помогли нам сделать очень мощный оптический прибор для «Татьяны-2». Этот спутник проработал меньше, чем «Татьяна-1», но он выполнил программу и сбросил всю информацию на пункты приема МГУ, и мы до сих пор изучаем данные, собранные «Татьянами».

Затем мы запустили спутник «ЮтСат» (YouthSat — «молодежный спутник») совместно с индийскими университетами. История этого спутника следующая. Во время визита президента Индии в нашу страну он посетил

МГУ, где у меня с ним состоялась встреча и я ему рассказал о запуске «Татьян». Будучи научно ориентированным человеком — физиком-ядерщиком, он сразу предложил совместно с их университетом сделать спутник. Более того, в Кремле на официальной встрече было принято решение включить запуск этого спутника в межгосударственное соглашение. 20 апреля 2011 г. спутник был запущен. Главное его назначение состояло в изучении вспышек на Солнце, т.е. влияния взрывов на Солнце на ближнюю атмосферу. Спутник «ЮтСат» успешно работал, и мы придавали ему большое значение, поскольку это была совместная работа российского и индийских университетов.

### Ломоносов в космосе

**— Сейчас готовится к запуску четвертый спутник — «Ломоносов». Какие задачи ставятся перед ним?**

— «Ломоносов» — вершина наших исследований на данный момент. Это тяжелый спутник весом в 500 кг, который полностью изготовлен в Роскосмосе. Роскосмос очень активно помогает космической программе МГУ, и я выражаю им огромную благодарность на всех этапах. Наши исследования были бы невозможны без их поддержки, в том числе финансовой. Хотя, конечно, основные финансовые ресурсы идут от Московского университета. Спутник «Ломоносов» продолжит исследования частиц высокой и сверхвысокой энергии, тех же световых транзиентных явлений в атмосфере, гамма-излучения, радиации в околоземном пространстве.

На «Ломоносове» будет стоять также прибор, разработанный учеными Астрономического института МГУ. Он связан с ориентацией по звездам, что очень важно для запуска любых космических аппаратов. Кроме того, на «Ломоносове» будет установлено оборудование, в создании которого я принимал участие и руковожу этой работой с прежних времен. Еще в середине 1970-х гг. ко мне обратился Георгий Тимофеевич Береговой и попросил меня возглавить работы по созданию невесомости на Земле, поскольку эта проблема — самая важная для тренировки космонавтов. До разработки этого аппарата космонавты тренировали поведение в невесомости в центрифуге или гидробассейне. Представьте себе огромный глубокий бассейн, в который погружался космонавт в скафандре, нагруженный так, что как бы плыл в невесомости. У него было очень мало возможностей для каких-то движений, связанных с силой тяжести. По невесомости тренировки были и в самолетах — по параболе Кеплера. Космонавт садился в самолет, который описывал эту параболу, и на короткое время (несколько десятков секунд) всплывал, плыл в невесомости, а потом, когда парабола заканчивалась, он падал на пол.

Это были основные способы тренировки. Конечно, это не устраивало космонавтов, и были случаи, когда они, попадая в реальную невесомость при запусках, тяжело ее переносили. Это была проблема. И тогда по просьбе Берегового я создал мощную группу из ученых — математиков, механиков, врачей, в том числе из центра подготовки. В нашу команду также входил один из космонавтов —



Валерий Быковский. В качестве базового механизма мы использовали центрифугу. Этот мощный аппарат создает большие перегрузки до 15, 20, а то и 30 единиц, но мы работали в диапазоне от одной до восьми-девяти единиц и создали полную имитацию невесомости для космонавта, который садился внутрь кабины. Было очень много степеней свободы: сама центрифуга, вращение кабины центрифуги, кресло космонавта — и тем самым мы могли придать тренирующемуся при вращении центрифуги любое положение. Главная задача состояла в том, чтобы ориентировать вектор нагрузки в направлении «грудь-спина»: тем самым привычная земная сила тяготения как бы «уходила». Нам удалось с помощью серьезной математики создать именно такое вращение центрифуги. Кроме того, для полной имитации невесомости мы надевали на ноги космонавта скафандр (тогда у нас был «Чибис»), и кровь тем самым равномерно распределялась, как в невесомости. И в отличие от самолета, где невесомость наступала на какие-то секунды, на нашем приборе можно было тренироваться продолжительное время, т.е. достигалась полноценная имитация невесомости.

Такой тренажер был первым в мире, да и сейчас он практически не имеет аналогов. Все космонавты, начиная с этого момента, проходили тренировки на нем. После полета они однозначно подтверждали, что восприятие невесомости на тренажере полностью адекватно ощущениям при полетах. На нем мы могли имитировать все этапы полета: старт, невесомость, посадку, различные перегрузки. Это была наша очень большая работа.

**— А какие приборы стоят на «Ломоносове»?**

— Мы разработали прибор, который используется для исследований поведения и физиологического состояния космонавта в невесомости. Например, такой любопытный факт: наши исследования показали, что в космосе установка зрения человека запаздывает, т.е. он может что-то уже успеть сделать, а потом увидеть, что он сделал. Это связано с поведением вестибулярной системы. Она была главным объектом и в первом эксперименте. Когда в космосе космонавт совершает поворот головы, то зрение может запаздывать примерно на полторы секунды и зафиксировать, в отличие от нормального состояния на Земле, то, что уже произошло. Был случай поломки антенны одним из космонавтов, что произошло как раз вследствие этого объективного явления, хотя тогда пресса писала, что он повел себя некачественно. За открытие этого явления, а также за тренажер наш коллектив был удостоен Государственных премий СССР и России.

**— Кто еще участвовал в этих разработках?**

— Первым космонавтом, кто с нами тренировался, был Валерий Федорович Быковский. За медицину отвечал Леонид Иосифович Воронин, очень известный врач в Центре подготовки космонавтов. Он нам оказывал большую помощь, наблюдая за космонавтами и их состоянием. Явление запаздывания зрения мы изучали совместно с группой академика Анатолия Ивановича Григорьева из Института медико-биологических проблем. Он был нашим соавтором.

## Совместными усилиями

**— Студенты других факультетов принимали участие в создании «Ломоносова»?**

— Очень многие факультеты внесли свою лепту. Если говорить о приборах, связанных с радиацией, материаловедением, воздействием частиц, то это физики, студенты с отделения астрономии. Если говорить о приборах, связанных с имитацией невесомости и физиологическим поведением, то это математики, механики и частично биологи. Кстати, на МКС наши биологи ставят опыты по изучению поведения микроорганизмов и их воздействия на человека через питание. Это отдельная большая программа наших биологов. При ближайшем запуске один из космонавтов, надеемся, возьмет наши приборы, потому что он сам биолог. Не обойтись и без психологов, поскольку есть проблемы, связанные с поведением человека и с точки зрения этой науки.

Так что здесь существует комплексный подход со стороны разных групп, в том числе и студенческих. Главное, что в создании приборов участвуют аспиранты и студенты, это наше достижение.

**— Понятно, что студенты не могут переплюнуть профессионалов в деле создания спутников. Но, может быть, были проявления каких-то талантов?**

— Конечно! Ребята в одной группе со взрослыми в Институте ядерной физики делают приборы. В ряде случаев аспиранты совершенно точно выступают как авторы. В области материаловедения сделано много изобретений в плане воздействия на микроэлементную базу, микроэлектронику, и аспиранты физического факультета, Института ядерной физики МГУ принимали в этом активное участие. В МГУ есть пункт приема информации и обработки данных, куда сбрасывается вся информация с наших спутников. Здесь сидят молодые ребята. Это здорово, когда студенты участвуют в самом главном — в изучении мира, в котором мы живем. Это страшно захватывает. Ведь мы почти ничего о нем не знаем.



Второй спутник МГУ «Татьяна-2» в сборочном цеху, 2009 г.



Первая женщина-космонавт В.В. Терешкова, почетный профессор МГУ им. М.В. Ломоносова, на праздновании Татьянина дня в МГУ, 2013 г.

**— На «Ломоносове» планируется установить систему отслеживания астероидов. В чем ее особенность?**

— У нас есть специальный портал, наземные станции наблюдения, система «Мастер», которая распределена от Москвы до Благовещенска. Один из телескопов этой серии стоит и на спутнике «Ломоносов». Идея состоит в том, чтобы объединить это все в одну систему. Это обеспечит наиболее полный охват прилегающего космоса, и я убежден, что будущее именно за такой системой. Не только в плане отслеживания астероидов, но и в плане наблюдения за космосом, открытия сверхновых, космических гамма-всплесков и т.д.

**— В МГУ есть что-то вроде центра управления?**

— Есть только центр приема информации, ее обработки и распределения по пользователям. А что касается управления, то мы включаемся в общую систему наблюдения за спутниками, которая создана в стране. Значительную часть времени спутник проводит вне зоны видимости наших наблюдательных станций, но есть корабли, которые подхватывают некоторые сектора наблюдений. Наша страна получает информацию от других станций наблюдения.

**За горизонтом событий**

**— Что после «Ломоносова»? Или вы так далеко еще не заглядывали?**

— Мы не должны останавливаться на запусках, и я думаю, надо как-то комплексно подходить к изучению атмосферы, развивать и наземные средства. Через несколько месяцев мы вводим в эксплуатацию мощнейший телескоп на юге страны, в горах Кавказа. Это будет второй по величине в России современный телескоп с зеркалом 2,5 м диаметром, очень наукоемкий. Мы только что

завершили его строительство. Наша задача — объединять усилия, как и положено университету. В наземных наблюдениях мы будем обладать уникальнейшим телескопом и большим числом наблюдательных ночей. Там одна из лучших точек для наблюдения. Плюс телескопы «Мастер», о которых я говорил, плюс наши приборы на спутниках, в том числе и на «Ломоносове», а также приборы, которые мы устанавливаем на других спутниках и станциях и даже на ракетах, запускающихся другими ведомствами в других интересах. Эта комплексная программа не имеет аналогов. Собственно, это и есть наша космическая программа развития до 2020 г. Она включает в себя десять научных направлений. Главное — это космическое направление, изучение космоса. Таким образом, мы объединяем все усилия всех факультетов, институтов в эту программу изучения космоса.

Безусловно, мы подтягиваем к задачам по изучению космоса и наш суперкомпьютер. У нас он самый мощный в России и в СНГ, на первых местах в Европе и на высоком месте в мире — супервычислитель «Ломоносов» мощностью 1,7 петафлопс. И многие задачи, связанные с изучением космоса, требуют счета именно на таком вычислителе. Так что здесь подключаются усилия еще и информатиков. Надо не только наблюдать на приборе и бумаге, но и интерпретировать, считать, суммируя все эти исследования, в том числе и погоду, явления в космосе, наблюдения за сверхновыми и гамма-всплесками. Сейчас очень большой интерес вызывает вопрос внесолнечных планет, и, наверное, мир туда шагнет очень скоро: проводятся наблюдения за планетами и небесными телами, где есть условия близкие к земным, а таких уже много открыто. По-видимому, это тоже будет задачей ученых нашего университета.

**— Какие новые задачи будут ставиться в плане исследований космического пространства?**

— Сейчас это изучение ближайших к нам планет — Луны, Марса... Захватывающие программы. Мы участвуем в поисках воды и льда, и здесь уже есть важные результаты. Найден водяной лед в приполярных областях Луны, на Марсе обнаружена территория, занятая тысячами, десятками тысяч тонн льда. Безусловно, в ближайшие годы эти две программы в мире будут приоритетом. Но большой теоретический интерес вызывает также изучение явлений вне нашей галактики, исследование ускоренного расширения Вселенной, выяснение природы загадочной темной материи, а также темной энергии, которая благодаря антигравитации вызывает ускоренное расширение нашей Вселенной. Будут вестись наблюдения за нестационарными процессами во Вселенной — вспышками сверхновых звезд,



загадочными космическими гамма-всплесками, сопровождающими процессы образования быстровращающихся черных дыр. Исследуются ядра галактик, где расположены сверхмассивные черные дыры с массой в миллиарды солнечных лет. Вообще, явления, приходящие к нам уже из дальних областей Вселенной, в ближайшее время будут занимать умы ученых, по крайней мере в фундаментальном плане. Естественно, изучение космоса — это и исследование поверхности, состава ближайших к нам соседей — планет и их спутников, возможность построения там станций для дальнейших стартов и, наверное, туризм. Прогнозируют быстрое развитие внеземного туризма, и уже есть списки желающих (пока за большие деньги) побывать на Луне или на Марсе. Так что приоритетная задача — изучение околоземного космического пространства, далекого космоса, больших высот, других галактик и практическая составляющая — исследование наших ближайших «соседей», их освоение и извлечение пользы для человечества. Возможно, эти небесные тела станут со временем резервными площадками для жителей Земли.

## Кадры решают

### — Как происходит подготовка специалистов?

— Я сторонник подготовки кадров, обладающих фундаментальными знаниями. Я не считаю, что нужно торопить подготовку к какому-то конкретному делу, потому что мы стоим перед океаном неизвестного и сейчас не можем предсказать, что понадобится, какие знания. Значит, надо воспитывать профессионалов, которые могут по мере возникновения задач адаптироваться, переучиваться и понимать явления широко. Поэтому мы будем предлагать готовить специалистов широкого плана, университетского, пусть даже других вузов, и ставить задачи для них в институтах, в соответствующих структурах. И это должно быть не просто распределение, необходимо решать задачи, пусть даже трудные. И, конечно, второе направление — подготовка или переподготовка высшего эшелона через магистратуру. Не обязательно студентов с первого курса готовить для отраслей космической области. Можно ведь взять специалиста, имеющего уже какое-то образование, инженера, а потом его перепрофилировать или дополнительно обучить в магистратуре для нового направления, придав этому образованию новый импульс, новый горизонт.

Это, кстати, очень известная практика. Раньше были так называемые инженерные потоки. На том же мехмате был поток студентов, поток инженеров. Это студенты из космических, атомных отраслей, которые приходили к нам на факультет и четыре года учились, вычеркнув из списка дисциплин общественные науки и оставив только математику, механику и те дисциплины, которые нужны, и оканчивали мехмат как инженеры, получая диплом. Что-нибудь подобное надо делать и сейчас.

### — На базе МГУ это можно оформить?

— Безусловно. Я думаю, это одно из предложений.

— **Чтобы ставить задачи перед студентами, нужно их сформулировать. Какие сейчас ставятся задачи?**

— В самом общем виде — полюбить науку. К сожалению, у нас на первый план выходят прагматические вопросы: «Кем я буду через четыре года?» или «Сколько я буду получать?». Привлечь в науку можно тех людей, которые готовы себя ей посвятить. Конечно, как во всякой науке, нужно уметь ставить задачи, которые понятны, которые привлекают. Задача учителя, педагога, профессора как раз состоит в том, чтобы увлечь. Например, мы ранее готовили математиков, и этого было достаточно для того, чтобы дальше отрасль уже брала, понимая, что это выдающийся человек, умеющий думать, и она его в течение двух-трех лет направляла, адаптировала к себе. И это работало, все наши успехи были достигнуты таким способом. Я бы сказал, что сейчас наша наука находится на марше. Сейчас другие задачи, таких отраслей нет, и время другое, поэтому наша система образования наряду с фундаментальной подготовкой должна настраивать на будущие прикладные задачи.

— **Сейчас в науке все больший упор делается на междисциплинарность, на исследования на стыке наук. Применимо ли это к МГУ?**

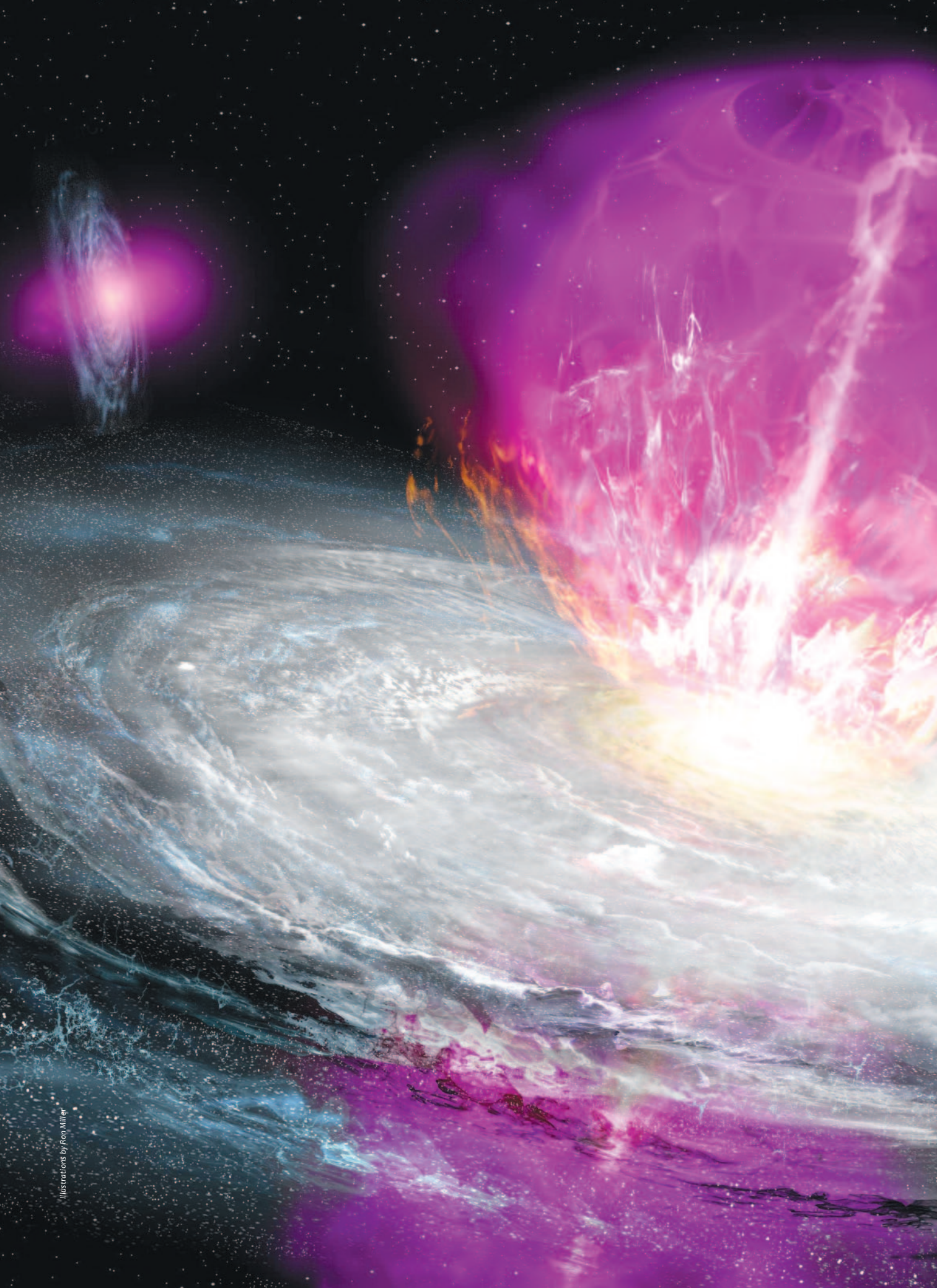
— Год назад мы придумали так называемые межфакультетские курсы. Их было 100 с лишним в этом семестре. Что это такое? Когда мы вне факультета объявили 100 курсов по смежным дисциплинам и выбрали 100 выдающихся лекторов, чтобы они прочитали эти курсы. Это курсы как раз на стыке наук: биология, математика и генетика или психология и математика, или право и логика — в общем, курсы с межфакультетским акцентом, которые дают хорошее приложение и занимаются тем, что сейчас очень востребовано. И произошло следующее. Сначала говорили: «Зачем это? И так есть учебные внутрифакультетские планы». Но случилось чудо: на эти курсы студенты записывались сами, причем порой по тысяче человек на один. Аудиторий просто не хватало, мы использовали актовывый зал. Почему? Потому что ребята, студенты хотят видеть проблематику уже не в своем узком направлении факультетской специализации, а гораздо шире — с тем, чтобы ориентироваться в выборе своей будущей профессии и приносить пользу.

— **А если на такие курсы захочет поступить медик, психолог или биолог, то он сможет это сделать?**

— Что касается межфакультетских курсов, у нас именно так. Мы требуем, чтобы студент обязательно слушал их на другом факультете. Но если говорить об образовании в целом, то необходимо, чтобы медик, например, сначала стал медиком, а потом уже получил космическую специализацию. И он сам будет заинтересован в том, чтобы получать максимально широкий научный охват, поскольку все основные результаты достигаются на стыке наук. Конечно, есть открытия средствами узкой специализации, но это большая удача. Так что я считаю, что чем скорее мы сможем перестроиться на умение рассказывать не только об узких специальностях, но и о приложениях, тем лучше. Будущее совершенно точно именно за таким подходом, и мы обязаны это учитывать, чтобы оставаться первыми. ■

Беседовал Виктор Фридман







Дмитрий Малышев, Мэн Су и Дуглас Финкбейнер

# Гигантские пузыри Млечного Пути

На десятки тысяч  
световых лет  
протянулись  
светящиеся лепестки  
от плоскости диска  
нашей Галактики. Их  
обнаружили недавно,  
и ученым только  
предстоит разгадать  
их тайну

## ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Малышев** — постдокторант в Стэнфордском университете и Национальной ускорительной лаборатории SLAC, член группы Космического гамма-телескопа Ферми.

**Мэн Су (Meng Su)** — постдокторант, участник программ им. Эйнштейна и им. Папалардо в Массачусетском технологическом университете и в Институте астрофизических и космических исследований им. Кавли при МТИ.

**Дуглас Финкбейнер (Douglas Finkbeiner)** — профессор астрономии и физики в Гарвардском университете и сотрудник Института теории и вычислений Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра.



**В**ясную ночь, вдали от городских огней, на небе можно увидеть красивейшую кружевную арку, точно сплетенную из мириад звезд, — это вид с ребра диска нашей родной галактики Млечный Путь. С древних времен люди дивились на темные облака, плывущие на молочно-белом фоне, и всего 400 лет назад Галилео Галлей, наведя телескоп на небо, обнаружил, что это молоко — свет бесчисленных звезд.

Устройство нашей Галактики было вновь пересмотрено благодаря использованию телескопа совершенно нового типа. Были открыты колоссальные структуры, возвышающиеся над галактическим центром и простирающиеся в космос на десятки тысяч световых лет. Эти светящиеся лепестки долго оставались незамеченными, потому что оказались видны только в гамма-лучах, для которых земная атмосфера непрозрачна.

Некоторые исследователи называют такие образования пузырями Ферми. Их природа загадочна, но ясно одно: они возникают благодаря бурным процессам в центральных областях нашей Галактики. Сверхмассивная черная дыра в центре Млечного Пути раскручивает горячий газ, в водоворотах которого зарождаются звезды, распускаясь, как нарциссы в плодородном питомнике. Звезды образуются в областях, богатых химическими элементами — этими «кирпичиками» для звезд новых поколений.

Пузыри Ферми были обнаружены почти случайно, но, будучи открытыми, стали предметом тщательных исследований: вполне возможно, что они смогут многое рассказать о рождении и эволюции нашей Галактики.

## Нежданное открытие

Первые свидетельства непонимания астрофизиками деталей внутреннего устройства Млечного Пути пришли не с гамма-лучами, а с радиоволнами микроволнового диапазона. Шел 2003 г. — все исследователи космоса были заняты анализом радиоданных по анизотропии реликтового излучения, полученных космическим аппаратом WMAP. Рассматривался и вопрос о вкладе межзвездной пыли в эти радиокарты. Пыль, безусловно, представляет самостоятельный интерес для астрономов, однако в данном случае для исследователей ранней Вселенной эта пыль стала досадным паразитным сигналом, который было необходимо аккуратно задать соответствующей моделью, а затем постараться как можно точнее отделить и вычистить из космологических данных.

Из данных WMAP нужно было удалить не только пыль. Поскольку астрономы вынуждены наблюдать реликтовый фон, находясь внутри богатого своим собственным излучением Млечного Пути, то паразитным сигналом считается также и синхротронное излучение нашей Галактики. В 2003 г. уже существовали довольно эффективные методы по удалению указанных вкладов, однако даже после фильтрации оставался какой-то неуточненный сигнал.

Источником неизвестного сигнала оказались центральные области Галактики. Одной из возможных его интерпретаций стало наличие в этих областях темной материи. Как известно, сведения о ее составе тоже до сих пор темны — на основе наблюдений установлено только то, что темная материя может взаимодействовать с обычным веществом посредством гравитации.

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Космический гамма-телескоп Ферми обнаружил массивные структуры, которые возвышаются над плоскостью диска нашей Галактики на десятки тысяч световых лет. Эти лепестки, распускающиеся из центра Млечного Пути, были названы пузырями Ферми.
- Астрономам не до конца понятен физический процесс, в результате которого образовались пузыри Ферми, но они полагают, что эти структуры — свидетели недавних бурных процессов, происходивших в нашей Галактике.
- Существуют два основных объяснения пузырей Ферми. Они могут быть раздутыми либо потоками частиц высокой энергии, идущих от центральной черной дыры нашей Галактики, либо ветром от формирующихся сверхновых.



В центре Млечного Пути предполагается избыток частиц темной материи, которые, взаимодействуя между собой, в принципе могли бы аннигилировать, т.е. порождать электроны и позитроны.

Темная материя остается недоступной наблюдениям, поскольку не подвержена электромагнитным взаимодействиям, но порожденные ею частицы (электроны) можно было бы в принципе зарегистрировать, поскольку они двигались бы в сильных магнитных полях по искривленным траекториям, порождая синхротронное излучение. Эти электроны, в свою очередь, могли бы взаимодействовать с окружающими фотонами, ускоряя их до сверхвысоких энергий (так называемое обратное комптоновское рассеяние).

Таким образом, если бы имели место процессы аннигиляции темной материи с рождением высокоэнергетических частиц, то с необходимостью должно было быть зарегистрировано и гамма-излучение, для чего было предложено использовать Космический гамма-телескоп Ферми.

Данные, полученные телескопом Ферми, были выложены в открытый доступ в августе 2009 г. Один из авторов этой статьи, Дуглас Финкбейнер, уже будучи профессором, и его молодой сотрудник Грегори Доблер (Gregory Dobler) начали работу по составлению карты Галактики в гамма-лучах. Ученые обнаружили избыток гамма-излучения в центральных областях Млечного Пути, что, по их утверждению, коррелировало с загадочным неучтенным сигналом в микроволновом излучении (исследователи назвали этот сигнал «микроволновой туман»). По результатам исследований была сразу же опубликована статья, в которой утверждалось, что и избыточное гамма-излучение, и «микроволновый туман» связаны с наличием в центральных областях нашей Галактики популяции электронов высоких энергий, однако об источнике таких электронов речи пока не шло, это оставалось загадкой.

В октябре того же года при подготовке иллюстраций к первой статье, но с учетом обновленных данных телескопа Ферми, авторы обратили внимание на четкие, хотя и слабые границы областей гамма-излучения, где обнаруживался резкий перепад сигнала. В астрономических наблюдениях подобные ступенчатые структуры обычно характеризуют переходные явления. Например, сверхновая порождает ударную волну с резкими границами, которые со временем сглаживаются и исчезают.

Если гамма-излучение было бы вызвано наличием темной материи, то все границы должны были быть давно сглаженными, потому что аннигиляция темной материи должна была идти уже миллиарды лет.

В ранних данных телескопа Ферми границы выглядели такими невнятными, что были интерпретированы как шум. Однако в новых данных такие структуры появились снова, что вызвало пристальное внимание исследователей. Удалось восстановить форму этой границы, и первоначальная интерпретация данных резко изменилась: гипотезу аннигиляции частиц темной материи сменила идея пузырей, которые были названы в честь открывшего их телескопа.

## ПОЛЯ, НАПРАВЛЯЕМЫЕ КОСМИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Стоит только астрономам обнаружить электромагнитное излучение, идущее из межзвездного пространства, они сразу же начинают работать в «обратном направлении», т.е. искать источник такого излучения. Существуют три основных источника электромагнитного излучения в нашей Галактике, и авторы статьи, исследуя пузыри Ферми, сталкивались со всеми.

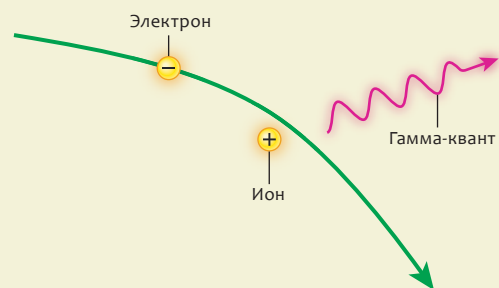
### Синхротронное излучение

Когда заряженные частицы (например, электроны) изменяют направление движения, то они испускают излучение. В центральных областях Млечного Пути сильные магнитные поля закручивают электроны по кругу. Эти ускоренные частицы генерируют так называемое синхротронное излучение. Галактическое синхротронное излучение происходит в основном в микроволновом диапазоне.



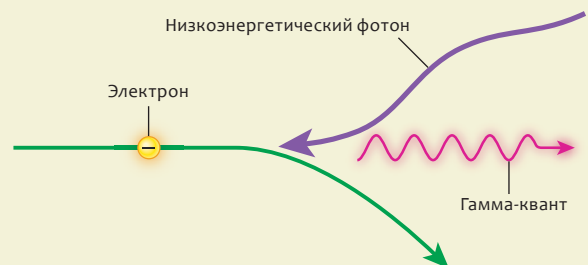
### Тормозное излучение

Если обладающий большой энергией электрон проходит рядом с другой заряженной частицей, то электрон в большом количестве случаев будет замедляться, теряя энергию в этом процессе. Потеря энергии выражается в испускании фотона, множество которых и порождают тормозное излучение. В галактике это излучение гамма-диапазона.



### Обратное комптоновское рассеяние

Электрон, летящий в Галактике, может столкнуться с фотоном. После такого столкновения фотоны окажутся гораздо более высокоэнергичными, чем до него. Обратное комптоновское рассеяние — один из важнейших механизмов формирования спектров рентгеновского и гамма-излучения объектов в Галактике.



## Образование пузырей

Несмотря на то что никто не ожидал увидеть пузыри из частиц сверхвысоких энергий, которые бы простились на десятки тысяч световых лет над плоскостью Млечного Пути, открытие не оказалось таким уж шокирующим.

Дело в том, что во многих других галактиках имеются пузыри, которые можно наблюдать как в рентгеновских лучах, так и на радиоволнах. Совершенствование гамма-телескопов, вполне возможно, позволит увидеть такие пузыри и в гамма-лучах.

Процессы образования пузырей в других галактиках во многом ясны ученым. В некоторых случаях они обязаны своему происхождению гигантским сверхмассивным (с массами около миллиарда масс Солнца) черным дырам, расположенным в галактических центрах. Галактическое вещество вблизи центра вовлекается во вращение вокруг черной дыры и падает в нее, внешнее напоминая хорошо известную картину водоворота, роль которого в Галактике выполняет, конечно, не вода, а газ и пыль. Последние своим стремительным вращением

создают сильные магнитные поля, которые в свою очередь порождают струи — выбросы излучения и космических частиц, расширяющих пузыри.

Ученым известно, что Млечный Путь также содержит сверхмассивную черную дыру в своем центре. Однако в нашей Галактике никогда не наблюдалось струй интенсивного излучения, идущего из ее ядра перпендикулярно ее плоскости (если подобные выбросы и существуют, то они, к счастью, направлены не в нашу сторону). Таким образом, у нас нет прямых свидетельств того, что именно в результате этого процесса раздуваются пузыри Ферми. Есть косвенный способ обнаружить следы таких струй: большое облако газа — Магелланов поток — находится высоко над галактическим центром. Если поток излучения будет обнаружен там, то это временно сделает электроны свободными в атомах в облаке. Электроны и ионы породят так называемое рекомбинационное излучение.

Именно это и было обнаружено астрономами. Возможно, около миллиона лет назад протекал период бурной аккреции (т.е. падения в результате вращения) вещества на центральную черную дыру нашей Галактики.

### Как это работает

#### ТЕ, КТО НАДУВАЕТ ПУЗЫРИ

Центр Млечного Пути — это дом сверхмассивной черной дыры с массой в миллионы солнечных масс. В других галактиках похожие черные дыры создают вокруг себя аккреционные диски из газа и пыли, которые нагреваются при их вовлечении в бешеный водоворот вокруг галактического центра. Энергия выбрасывается в виде потоков излучения — струй (джетов) — перпендикулярно плоскости вращения аккрецирующего вещества. Эти струи и могут надувать пузыри Ферми. Однако в нашей Галактике астрономы не обнаружили таких сильных потоков излучения.



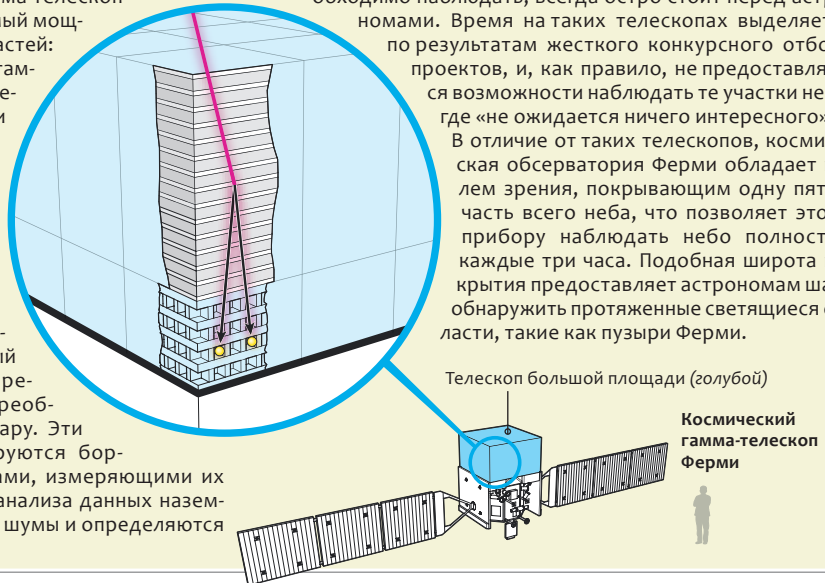


## Телескоп Ферми

## ГАММА-ГЛАЗ

Атмосфера Земли не пропускает гамма-излучение, которое обладает энергиями, в миллиарды раз превосходящими энергии видимого света. Единственный способ непосредственно зарегистрировать гамма-излучение — вынести приборы за пределы атмосферы. Космический гамма-телескоп Ферми на сегодняшний момент — самый мощный. Он состоит из двух основных частей: устройства слежения за всплесками гамма-излучения в режиме реального времени и Телескопа большой площади (LAT — Large Area Telescope) — наиболее чувствительного к гамма-излучению прибора высокого разрешения. LAT коренным образом отличается от любых оптических телескопов. У него нет зеркал, линз, фокальной плоскости. Работа этого телескопа больше напоминает принцип действия экспериментальной установки для задач физики частиц. Каждый входящий в прибор гамма-квант в результате столкновения с атомами преобразуется в электрон-позитронную пару. Эти частицы в свою очередь регистрируются бортовыми детекторами и калориметрами, измеряющими их энергию. В результате дальнейшего анализа данных наземными фильтрами удаляются фоновые шумы и определяются

направления прихода зарегистрированных гамма-квантов и их энергии. Все данные находятся в открытом доступе. Большинство телескопов могут отслеживать только малую часть неба, и вопрос о том, какой именно участок неба необходимо наблюдать, всегда остро стоит перед астрономами. Время на таких телескопах выделяется по результатам жесткого конкурсного отбора проектов, и, как правило, не предоставляется возможности наблюдать те участки неба, где «не ожидается ничего интересного». В отличие от таких телескопов, космическая обсерватория Ферми обладает полем зрения, покрывающим одну пятую часть всего неба, что позволяет этому прибору наблюдать небо полностью каждые три часа. Подобная широта покрытия предоставляет астрономам шанс обнаружить протяженные светящиеся области, такие как пузыри Ферми.



Аккреция и породила выбросы высокоэнергетического излучения и ультрафиолетовое излучение, которые «выбивали» электроны в Магеллановом потоке. Такие процессы также могли послужить основой для формирования пузырей Ферми.

Кроме того, галактики, подобные нашей соседке M42, имеют пузыри — побочные продукты интенсивного звездообразования в их галактических центрах. В звездной колыбели рождаются звезды самых разных размеров. Чем массивнее звезда, тем быстрее она сжигает свое ядерное топливо. Когда топливо исчерпывается, звезда коллапсирует (т.е. сжимается) и выбрасывает огромное количество энергии, срывающей внешние слои звезды в результате взрыва сверхновой, оставляя позади, в своих недрах нейтронную звезду или черную дыру. Сверхновые и создают «ветер» из частиц, который может «раздувать» пузыри вокруг галактического центра.

Известно, что в центральных областях Млечного Пути тоже происходило интенсивное звездообразование. Нескольким тысячам звезд вокруг центральной черной дыры всего около 6 млн лет — они еще младенцы в масштабах космического времени. Однако если бы среди них оказались очень массивные звезды, то 6 млн лет хватило бы для их эволюции и становления сверхновыми. Эти сверхновые могли бы управлять струями горячего газа из галактического центра, достаточно мощными для раздувания пузырей.

### Следующие шаги

История пузырей Ферми оказалась тесно связанной с историей и эволюцией Млечного Пути. Пузыри смогли бы прояснить, как происходит аккреция вещества


на центральную черную дыру и как космические лучи высоких энергий взаимодействуют с межзвездным газом. Несмотря на то что такие структуры, как пузыри Ферми, существуют и в других галактиках, их изучение в нашей Галактике может и должно быть произведено гораздо более детально.

Для того чтобы извлечь из пузырей Ферми максимальную информацию, их изучают на всем спектре электромагнитных волн. Одна из самых удивительных их особенностей — то, что наиболее четко они видны в гамма-лучах и практически не заметны на других частотах. Есть надежда, что последние данные космического аппарата «Планк» по исследованию микроволнового излучения со всего неба предоставят новую недостающую информацию.

Возможно, полезным окажется и выявление структуры пузырей Ферми в рентгеновском диапазоне, однако такие исследования лежат пока за пределами имеющихся технологий. Дело в том, что пузыри — гигантские структуры, возвышающиеся над диском нашей Галактики, а почти все рентгеновские спутники имеют очень узкое поле зрения. Задача срочной попытке получить представление о горном хребте, глядя на него сквозь толстую макаронину. После открытия Галилеем того факта, что Млечный Путь составлен из звезд, понадобилось три столетия, чтобы понять, что наша родная Галактика — всего лишь одна из многих миллиардов галактик, рассеянных во Вселенной. Если повезет, то на разгадку тайны пузырей Ферми астрономы потратят все же немного меньше времени. ■

Перевод: О.С. Сажина






АСТРОФИЗИКА

# НЕРАСКРЫТЫЕ ТАЙНЫ





Галактика Туманность Андромеды, подобно большинству других спиральных галактик, вращается быстрее, чем если бы за действующие в ней гравитационные силы отвечало только видимое вещество. Для того чтобы объяснить такое быстрое вращение, было введено понятие «темная материя» — не наблюдаемое телескопами вещество, обладающее гравитационным полем.

Богдан Добреску и Дон Линкольн

# СКРЫТОГО КОСМОСА

В нашей Вселенной преобладают невидимые частицы темной материи, которые отличаются большим разнообразием и необычностью свойств



## ОБ АВТОРАХ

**Богдан Добреску** (Bogdan A. Dobrescu) — исследователь по теории физики частиц, работает в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми в Батавии, штат Иллинойс. Занимается поиском новых частиц и их взаимодействий. Исследовал возможность рождения частиц темной материи на ускорителе в Фермилабе и их последующего наблюдения в нейтринных детекторах.



**Дон Линкольн** (Don Lincoln) — сотрудник лаборатории им. Ферми, проводящий исследования с данными БАК. Автор нескольких научно-популярных книг, включая «БАК: невероятная история бозона Хиггса и другие вещи, которые взорвут ваш мозг» (*The Large Hadron Collider: The Extraordinary Story of the Higgs Boson and Other Stuff That Will Blow Your Mind*, 2014).



# К

расивые завитки спиральных рукавов нашей ближайшей космической соседки, галактики Туманность Андромеды, представляются загадочными. Головокружительная скорость их вращения не может быть объяснена с помощью известных законов физики, описывающих движение видимого вещества в диске галактики. Другими словами, силы притяжения, генерируемые видимым веществом галактик, привели бы к тому, что звезды, находящиеся на периферии, двигались бы медленнее, чем это происходит в действительности. Если видимое вещество — это все, что есть в Туманности Андромеды, то и эта галактика, и другие подобные ей быстро вращающиеся галактики просто не могли бы существовать.

Согласно представлениям современной космологии, существует невидимый тип вещества, так называемая темная материя. Она окружает и пронизывает многие галактики, в том числе галактику Туманность Андромеды, добавляя необходимое гравитационное поле для поддержания наблюдаемого темпа вращения. Темная материя составляет около 25% от общей массы нашей Вселенной, и с ее помощью удастся объяснить многие загадки космоса: быстрое вращение галактик в скоплениях галактик, распределение вещества при слиянии

скоплений галактик, а также наблюдения гравитационного линзирования (отклонение лучей света в гравитационном поле) далеких галактик.

В простейших моделях темная материя представлена однотипными невидимыми и до сих пор не обнаруженными частицами, которые должны восполнять недостаток полной массы Вселенной. Десятилетия поисков прямых доказательств существования частиц темной материи не увенчались успехом. Кроме того, сохраняются некоторые несоответствия между астрономическими

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Согласно научным данным, наша Вселенная должна содержать больше вещества, чем то, которое доступно телескопам. Первоначально поиск темной материи был сфокусирован на поиске невидимых частиц только одного типа. Однако десятилетия экспериментальных поисков не дали результата. Все более правдоподобными становятся экзотические модели. Мир темной материи может оказаться очень многообразным и содержать множество разных частиц, очень слабо взаимодействующих с привычным видимым миром.
- Многокомпонентная темная материя могла бы формировать темные атомы, темные молекулы и даже большие структуры из них, которые могли бы составлять гигантскую невидимую часть галактических дисков, простирающуюся за спиральные рукава Млечного Пути и других галактик. В настоящее время ведутся наблюдения с целью поиска следов таких темных структур.

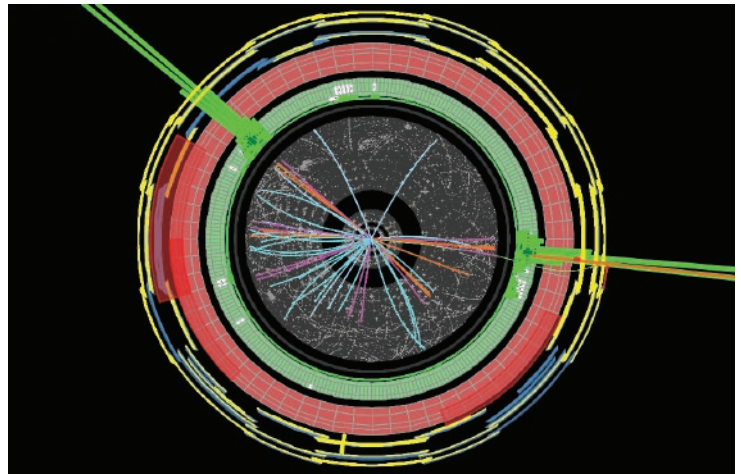


наблюдениями и простейшими теориями темной материи. Сочетание теоретических противоречий в совокупности с отрицательными результатами наблюдений этой неуловимой субстанции привели некоторых ученых к переосмыслению традиционных теорий и к представлению о более сложной структуре темной материи. Это невидимое вещество может не состоять из единственного типа частиц, но, аналогично обыкновенному известному нам веществу, также может оказаться многосоставным.

Последние несколько лет ученые укрепились во мнении, что темная материя должна быть разнообразна. Возможно, существуют даже новые типы взаимодействий, к которым почти не чувствительны обычные частицы, но которым подчиняются частицы темной материи. Недавние наблюдения сливающихся галактик могут послужить предварительным подтверждением такой гипотезы. Неизвестные силы взаимодействия могли бы объяснить имеющиеся противоречия между моделями темной материи и наблюдениями. Если темная материя действительно обладает сложной структурой, то наша Вселенная предстанет гораздо более интересной и интригующей, чем в стандартной космологической модели.

### Скрытое вещество

Несмотря на то что до сих пор не известен состав темной материи, все-таки можно кое-что сказать о ее свойствах, исходя из наблюдений ее влияния на обычное вещество, а также из моделирования гравитационных свойств этого невидимого вещества. Например, частицы темной материи должны двигаться гораздо медленнее света, в противном случае флуктуации плотности в ранней Вселенной не смогли бы привести к формированию наблюдаемых нами крупномасштабных структур (галактик). Далее, поскольку темная материя не поглощает и не испускает электромагнитное излучение, то она должна быть электрически нейтральной. Частицы этого скрытого вещества должны быть достаточно массивными, иначе они двигались бы с околосветовыми скоростями, что, как было сказано, противоречит наблюдательным данным. Кроме того, такие частицы практически не должны быть подвержены сильным взаимодействиям, формирующим ядра атомов, — в противном случае следы взаимодействия частиц темной материи были бы широко наблюдаемы в виде образования частиц сверхвысоких энергий (космических лучей). До недавнего времени считалось, что частицы темной материи подвержены силам слабого взаимодействия (силы, ответственные за радиоактивный распад), но наблюдения практически исключили и это предположение. Заметим,



**Результат протон-протонного столкновения**, зарегистрированного детектором ATLAS на Большом адронном коллайдере в CERN, совмещен с некоторыми моделями темных фотонов (зеленые линии)

что все же остается возможность того, что темная материя подвержена влиянию слабого взаимодействия. Однако для соответствия наблюдениям необходимо существование дополнительных неизвестных частиц помимо темной материи.

Мы знаем также, что темная материя стабильна на космологических временных интервалах. Аргумент в защиту этой гипотезы простой: нет хорошо обоснованного механизма непрерывного рождения скрытого вещества. Другими словами, темная материя — это первичное вещество, рожденное в результате Большого взрыва. Слова о том, что частица стабильна, подразумевают ее важнейшие физические особенности. Стабильность означает наличие свойства сохраняться, т.е. частица темной материи не может меняться, ее распад запрещен. Можно проиллюстрировать вышесказанное на примере хорошо знакомого электрического заряда, дающего стабильность электрону. Прописная истина физики гласит, что частицы всегда распадаются на более легкие, если ничто не препятствует распаду. Электрон обладает электрическим зарядом, а все известные стабильные частицы, которые легче электрона, — фотон и нейтрино — электрически нейтральны. Из энергетических соображений электрон мог бы распасться на эти элементы, но закон сохранения заряда запрещает такие каналы распада.

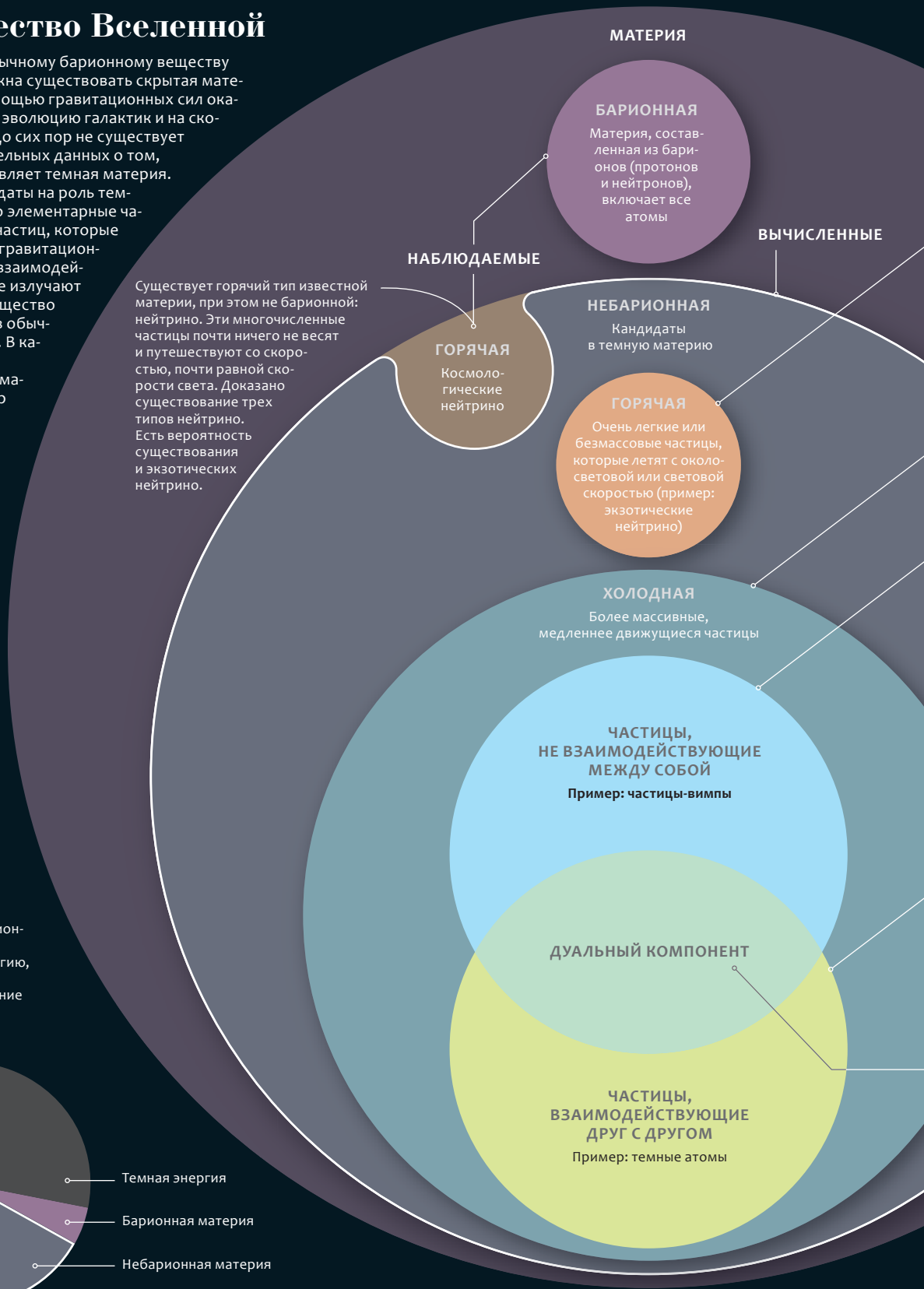
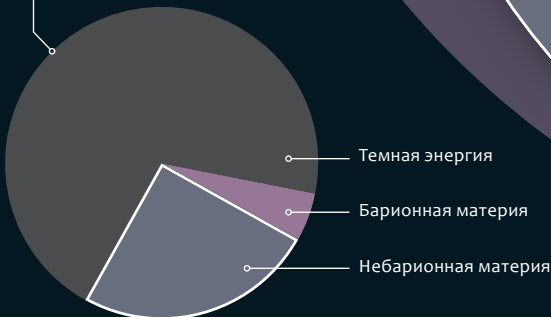
Большинство моделей темной материи основываются на предположении о том, что существует некая сохраняющаяся характеристика, по историческим соображениям названная «паритетность»; она (для определенности) равна  $-1$  для частиц темной материи и  $+1$  для всех других известных частиц. Таким образом, запрещен распад частиц темной материи на частицы обычной материи, потому что в противном случае паритетность не сохранялась бы.

# Все вещество Вселенной

В дополнение к обычному барионному веществу во Вселенной должна существовать скрытая материя, которая с помощью гравитационных сил оказывает влияние на эволюцию галактик и на скопления галактик. До сих пор не существует прямых наблюдательных данных о том, что собой представляет темная материя. Возможные кандидаты на роль темной материи — это элементарные частицы или группы частиц, которые не испытывают ни гравитационного, ни сильного взаимодействия, и поэтому не излучают и не поглощают вещество и не связываются в обычные атомные ядра. В каком именно виде находится темная материя — до сих пор не решенная проблема.

Существует горячий тип известной материи, при этом не барионной: нейтрино. Эти многочисленные частицы почти ничего не весят и путешествуют со скоростью, почти равной скорости света. Доказано существование трех типов нейтрино. Есть вероятность существования и экзотических нейтрино.

Полная масса нашей Вселенной включает вещество — как барионное, так и не барионное — и темную энергию, которая вызывает ускоренное расширение пространства.





## Основные кандидаты в темную материю

### ГОРЯЧАЯ

Если вся первичная темная материя состояла из быстро движущихся частиц, то она никогда не смогла бы сгруппироваться в достаточно плотные облака для формирования протогалактик. Однако небольшая часть темной материи все-таки может быть горячей.

### ХОЛОДНАЯ

Модель медленно движущихся частиц темной материи лучше согласуется со структурой галактик и с наблюдаемым распределением вещества во Вселенной. По крайней мере 95% темной материи должны быть холодными.

### МАТЕРИЯ, ЧАСТИЦЫ КОТОРОЙ НЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ДРУГ С ДРУГОМ

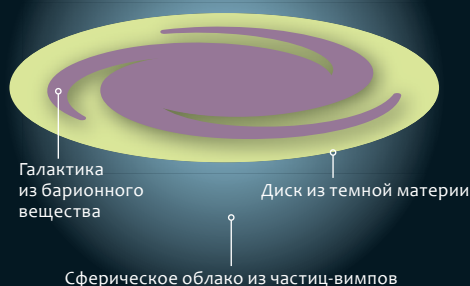
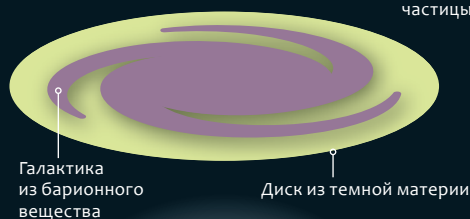
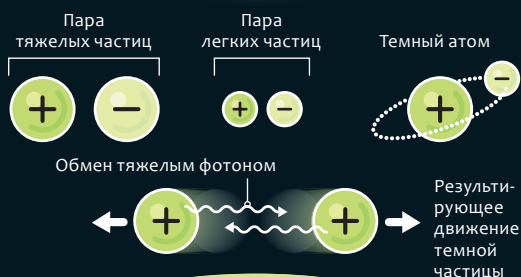
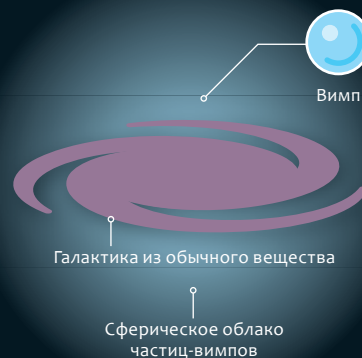
Простейший тип частиц холодной темной материи — это слабо взаимодействующие массивные частицы, вимпы (*WIMP*). Такие частицы очень редко или вообще никогда не взаимодействуют ни друг с другом, ни с частицами обычной материи. Частицы-вимпы могут формировать большие сферические облака, гравитационно притягивающие обычную барионную материю, служа, таким образом, зародышами галактик.

### МАТЕРИЯ, ЧАСТИЦЫ КОТОРОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ДРУГ С ДРУГОМ

Если частицы темной материи взаимодействуют между собой, то взаимодействие должно осуществляться какой-то силой — «темной», потому что она не должна влиять на обычное вещество. Эта сила может быть разновидностью «темного электромагнетизма», а темные частицы могут обладать соответствующими положительными и отрицательными зарядами и обмениваться переносчиками сил темного электромагнетизма — темными фотонами. В рамках такой теории возможны многие типы темных частиц — и тяжелых, и легких, — которые могут притягивать друг друга и формировать атомы. Таким образом, в дисках галактик могут формироваться сложные структуры темной материи, превышающие размерами спиральные рукава барионной материи.

### ДУАЛЬНЫЙ КОМПОНЕНТ

Темная материя может состоять из двух типов холодных частиц — не взаимодействующих друг с другом (подобно вимп-частицам) и взаимодействующих друг с другом. В такой модели вокруг галактики существует сферическое облако частиц-вимпов, а в плоскости ее барионного диска — второй диск из взаимодействующих друг с другом (но не с обычным веществом) частиц темной материи.



Простейшая модель темной материи, которая отвечает всем требованиям, содержит одну частицу, называемую «вимп» (от англ. *WIMP, weakly interacting massive particle* — «слабовзаимодействующая массивная частица»). Термин «слабо» используется в общем смысле и может обозначать не только силы именно слабого взаимодействия. Частицы-вимпы имеют хорошее теоретическое обоснование, но найти их оказалось гораздо сложнее, чем ожидалось. С 90-х гг. прошлого века ученые проводили множество экспериментов с целью прямого обнаружения взаимодействия вимпов с частицами обычной материи. Такие события должны быть очень редкими.

Для получения необходимой чувствительности детекторы охлаждались до экстремально низких температур и помещались глубоко под землю, чтобы защитить их от космического излучения, которое могло бы имитировать следы темной материи. Несмотря на серии все более мощных экспериментов, никаких следов вимпов обнаружено не было. Модель частиц-вимпов действительно способна объяснить многие загадки наблюдаемой Вселенной, однако она не может учесть все. Например, согласно теории, включающей вимпы, вокруг нашей Галактики должно вращаться огромное количество мелких галактик-спутников, а этого не наблюдается. Кроме того, темная материя должна обладать даже большей плотностью в центре галактик, чем та плотность, которая требуется для объяснения их кривых вращения. В современной наблюдательной космологии ситуация быстро меняется, и некоторые проблемы находят возможные решения. Так, недавнее открытие дополнительных галактик-спутников (проект *Dark Energy Survey*) дает основания утверждать, что карликовые галактики — спутники Млечного пути все же существуют, но просто еще не обнаружены в предсказываемом количестве.

Недостатки теорий с вимпами открыли путь для более сложных моделей темной материи.

### Составная темная материя

Разумно предположить, что темная материя состоит не из одного-единственного типа частиц, но существуют разные типы невидимых частиц, управляемых силами, которые никак не влияют на обыкновенные частицы. Одна из идей, которая в силах примирить наблюдения и моделирование, заключается в способности частиц темной материи взаимодействовать друг с другом. Другими словами, существуют силы, действующие только на частицы темной материи и не действующие на частицы обыкновенной материи. Эти частицы могли бы, например, быть носителями нового типа «темного заряда», который притягивает или отталкивает частицы темной материи, сохраняя

их электрическую нейтральность. Подобно тому как обычные электрически заряженные частицы могут рождают фотоны (частицы света — переносчики электромагнитного взаимодействия), частицы темной материи могут испускать «темные фотоны», которые, конечно, не будут частицами света, но они взаимодействуют с частицами, обладающими темным зарядом, аналогично тому, как фотоны взаимодействуют с электрически заряженными частицами.

Однако нельзя проводить полные аналогии темного мира с миром нормальных частиц. Действительно, предположим, что законы темного мира в точности зеркальны по отношению к нашим законам. В таком темном мире темные атомы могут порождать темные фотоны в том же количестве, что и обычная материя обычные фотоны. В нашем мире излучение фотонов приводит к обмену энергией, что служит объяснением того, почему галактики приобретают дисковую структуру.

## Разумно предположить, что темная материя состоит не из одного-единственного типа частиц, но существуют разные типы невидимых частиц, управляемых силами, которые никак не влияют на обыкновенные частицы

Облака газа внутри галактик — источники электромагнитной энергии; в них вещество имеет тенденцию сгущаться. Закон сохранения углового момента препятствует сжатию вещества в точку, но способствует формированию дисковых структур. Если для темной материи справедливы те же законы, что управляют обычной материей, то излучение темных фотонов должно способствовать образованию плоских дисков в галактиках из темной материи. Однако распределение подавляющего количества темной материи в обычных галактиках, необходимого для объяснения свойств этих галактик, больше напоминает сферическое облако. Таким образом, модель темного мира, полностью зеркального нашему миру, не может быть принята.

Существуют альтернативные теории. Возможно, что свойства небольшой части темной материи представляют собой зеркальное отражение свойств обычной материи, а большая часть темной материи ведет себя подобно частицам-вимпам. Существует другая модель, когда темный заряд



гораздо меньше электрического заряда обычных электронов и протонов, в результате чего излучение темных фотонов уменьшается. Физики-теоретики (включая и одного из авторов этой статьи, Богдана Добреску) предложили множество идей о возможных частицах темного сектора и действующих на них силах, используя наблюдательные данные для направления теоретической мысли и отсеечения заведомо нежизнеспособных спекуляций. Один из наиболее простых сценариев — привлечение всего лишь двух сортов невидимых частиц, дающие некоторые представления о работе со структурами темной материи.

### Темные фотоны

Представьте себе темный мир, в котором существуют два типа темных зарядов — один положительный и один отрицательный. В такой модели можно определить аналог электромагнитных сил, благодаря которым темные частицы излучают или поглощают темные фотоны. Как было изначально определено, частицы заряжены по аналогии с обычными электромагнитными зарядами. Таким образом, положительно и отрицательно заряженные темные частицы могут взаимодействовать и аннигилировать с образованием темных фотонов, аналогично нормальным частицам.

Можно оценить силы темного электромагнитного взаимодействия и, следовательно, сделать предположение, как часто происходит аннигиляция частиц темной материи, с помощью анализа того, как эти силы могли бы воздействовать на эволюцию галактик. Напомним, что причина, по которой галактики обладают плоскостной структурой, заключается в том, что электромагнитные силы ведут к потере энергии обычной материей и, как следствие, к ее концентрации в диске. Потеря энергии происходит даже без учета процесса аннигиляции. Поскольку известно, что первичное распределение темной материи в галактиках преимущественно сферическое и со временем темная материя не сгруппировалась к плоскости диска, то можно заключить, что темная материя не теряла энергию за счет излучения темных фотонов в той же мере, как и обычная материя. В работе, опубликованной в 2009 г. группой ученых из Калифорнийского технологического института, было показано, что из вышеприведенных рассуждений следует чрезвычайно малость темного заряда, примерно 1% от обычного электромагнитного заряда. Несмотря на небольшую величину заряда, соответствующая сила все же может существовать и значительно влиять на динамику галактик.

### Темная галактика

До сих пор мы рассуждали о модели темной материи, состоящей из положительно и отрицательно заряженных частиц, испускающих темные фотоны.

Однако такой сценарий выглядит довольно невзрачно по сравнению с избытком частиц обычной материи. На что походил бы темный мир, допусти и он подобное разнообразие составляющих?

Существует не одна теория многокомпонентной темной материи, которая включает как две, так и большее количество темных частиц. Один из интересных вариантов — модель частичного взаимодействия темной материи — был предложен в 2013 г. Лизой Рэндалл (Lisa Randall) и ее коллегами из Гарвардского университета. Ученые построили модель темной энергии, состоящей из частиц-вимпов, а также из небольшого количества двух типов фермионов — тяжелого и легкого, — каждый из которых обладает темным зарядом (напомним, что фермионами называют частицы с квантовомеханическим спином  $1/2$ ; в обычном мире примеры фермионов — протоны, нейтроны и составляющие их кварки). Поскольку в модели постулируется, что темные фермионы обладают темным зарядом, то они излучают темные фотоны и могут притягиваться друг к другу.

Хотя следует быть очень осторожными, следуя аналогиям между обычной и темной материей, вышеописанная модель дает темный протон, темный электрон и темный фотон — переносчик аналога электромагнитного излучения, который связывает вместе две темные частицы. В зависимости от массы и зарядов темных фермионов частицы могут комбинироваться, формируя темные атомы со своей химией, темными молекулами и, возможно, даже более сложными структурами. Концепция темных атомов была детально разработана в 2010 г. Дэвидом Капланом (David E. Kaplan) и другими учеными из Университета Джонса Хопкинса.

Физики из Гарвардского университета, которые предложили идею фермионов темной материи, задались целью определить верхние пределы количества скрытого вещества, которое могло бы сильно взаимодействовать с темными фотонами, с помощью наблюдательных данных. Была определена общая масса темной материи — и оказалось, что она сопоставима с массой всей видимой материи. В такой модели наша Галактика состоит из большого сферического облака частиц, подобных вимп-частицам, которые составляют 70% от общей массы Млечного Пути. Облако окружает два плоских диска, каждый из которых содержит 15% общей массы. Один диск — из обычного вещества, он включает в себя спиральные рукава, наблюдаемые телескопами. Другой диск состоит из сильно взаимодействующей темной материи. Положения обоих дисков не обязательно совпадают, но диски одинаково ориентированы. При таком представлении галактика из темной материи располагается в том же самом месте, что и наша Галактика. Сразу сделаем предостерегающее замечание: галактика из темной материи может не включать темные

звезды или большие планеты, потому что в противном случае их бы обнаружили методами гравитационного линзирования.

Это может прозвучать странно, но дополнительный невидимый диск в нашей Галактике не окажет значительного влияния на наш обычный мир. Доказательством истинности теории должна быть ее совместимость с наблюдательными данными. Диск темной материи может существовать, но так, что мы его не замечаем.

### О будущих возможных наблюдениях

Поиск многокомпонентной темной материи можно осуществлять теми же методами, что и поиск вимп-частиц, т.е. используя чувствительные подземные детекторы. Одним из указаний на существование частично взаимодействующей темной материи и аргументом в пользу модели о концентрации темной материи в диске, почти в плоскости нашей Галактики, может послужить более плотный, чем в случае вимп-частиц, поток темных частиц. Более плотный поток означает повышенную вероятность регистрации частиц темной материи.

Ввиду отсутствия естественно наблюдаемого материала для проведения подобных экспериментов ученые надеются понаблюдать темной материи (наряду с другими экзотическими частицами) на ускорителях. Поскольку о взаимодействии темной материи с обычным веществом известно очень немного и, следовательно, о процессах, возможных на ускорителях, тоже ничего с определенностью сказать нельзя, требуется долгосрочная программа действий. Следует учесть всевозможные модели темной материи начиная от простейших вимп-моделей и заканчивая более сложными темными структурами. При этом необходимо сделать ряд дополнительных предположений о том, как темная материя взаимодействует с обычной материей и какие новые силы могут отвечать за такие взаимодействия, не противореча наблюдательным данным. Такие предположения необходимы, потому что если темная материя взаимодействует с обычным веществом только гравитационно, то ее невозможно будет создать в ускорителе и никогда нельзя будет обнаружить прямыми наблюдательными методами. Новое взаимодействие должно быть отлично от того, посредством которого темная материя взаимодействует сама с собой.

Расположенный вблизи Женевы в CERN Большой адронный коллайдер (БАК) — самый мощный из существующих ускорителей. Достигаемые сверхвысокие энергии позволяют вести поиски

тяжелых частиц темной материи (напомним, что чем массивнее частица, тем больше энергии требуется для ее рождения на ускорителе), а также тех частиц, взаимодействия которых становятся более частыми с повышением энергии. Поскольку уже совершенно очевидно, что темная материя если и взаимодействует с обычным веществом, то очень слабо, то, в противоположность обычному веществу, очень маловероятно ожидать каких-то непосредственных следов темной материи на ускорителе. Поиски темной материи на ускорителях ведутся косвенными методами: выявляются взаимодействия, в которых не хватает энергии. Поясним сказанное примером. В результате столкновения двух протонов может образоваться обычная частица, или после столкновения обычных частиц могут образоваться частицы темной материи. Наблюдательные проявления последнего

## В зависимости от масс и зарядов темных фермионов они могут комбинироваться, создавая темные атомы со своими собственными химическими законами и темные молекулы. Открываются возможности создания и более сложных структур

события заключаются в том, что до столкновения есть энергия, а после столкновения ее нет. Можно рассчитать, в скольких столкновениях могут быть такие эффекты исчезновения энергии, если априори принять, что темной материи не существует. Далее следует оценить, происходит ли в действительности таких событий больше, чем это следует из теоретических расчетов.

Никакого избытка подобных событий на БАК обнаружено не было, из чего следует, что взаимодействия частиц темной материи с обычным веществом действительно очень редки (если они вообще происходят). Однако с установкой весной 2015 г. дополнительного оборудования на БАК появилась новая возможность выявить сигналы от темной материи. Быть может, уже не за горами открытие века.

Помимо поиска частиц-вимпов и других более сложных частиц темной материи ведутся исследования и по другим направлениям: например, ищут темные фотоны. В некоторых моделях темные фотоны могут непрерывно переходить в обычные фотоны и обратно, согласно законам квантовой механики. Такой механизм дает потенциальную



возможность выявить темные фотоны. Иногда темный фотон наделяется массой (в этом случае термин «темный фотон» не следует ассоциировать с обычным безмассовым фотоном). Если темный фотон обладает массой, то он в принципе может распадаться на более легкие частицы. Поскольку, в свою очередь, темный фотон может трансформироваться в обычный фотон, то в таком процессе существует вероятность рождения пар электронов и антиэлектронов или мюонов и антимюонов.

Экспериментальные группы (в одной из которых задействован автор настоящей статьи, Дон Линкольн) и занимаются поиском столкновений частиц, результатом которых становится рождение электрон-позитронных или мюон-антимюонных пар. Такие исследования готовятся на БАК и других ускорительных комплексах, из которых перечислим несколько: *KLOE-2* (проект Национальной лаборатории Фраскати Национального института ядерной физики, Италия), эксперимент по поиску тяжелых фотонов в Национальной ускорительной лаборатории им. Томаса Джефферсона (Ньюпорт-Ньюс, штат Виргиния, США), эксперимент *ВаВаг* в Национальной ускорительной лаборатории *SLAC*.

Другой интересный подход реализован в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми (Батавия, штат Иллинойс, США). Предлагается создавать потоки частиц темной материи. В настоящее время в лаборатории генерируются потоки нейтрино, которые попадают в удаленные мишени. Нейтрино — очень легкие частицы, подчиняющиеся силам слабого взаимодействия. Если темная материя взаимодействует с обычной материей посредством частиц, подобных темным фотонам, то, возможно, темная материя создается в таких потоках и, вероятно, будет обнаружена детекторами Фермилаба (детекторы *MiniBooNE*, *MINOS*, *NOvA*).

Наконец, можно искать проявления темной материи в астрономических событиях, например при слиянии двух галактик. Когда темная материя одной галактики ударяет в темную материю другой галактики, то частицы могут отталкивать друг друга, обмениваясь темными фотонами. Изучение столкновений галактик пока не выявило такого феномена, но недавние наблюдения скопления Абеля 3827, достаточно близкого к Земле и удачно ориентированного, возможно, обнадеживают исследователей. Однако необходимы дополнительные исследования для подтверждения сигнала, который мог бы подтвердить модели многосоставной темной материи.

### Космическая загадка

Нет сомнений, что ученым предстоит решить серьезную загадку. На гигантских космологических масштабах обычное вещество не ведет себя

согласно известным законам физики и видимому распределению масс. Из-за такого несоответствия считается, что существует темная материя. Дискуссии о том, какой вид имеет эта скрытая материя, становятся все более ожесточенными, поскольку ни наблюдения, ни эксперименты до сих пор не могут предоставить доказательств даже простейших ее моделей. По этой причине, а также из-за несоответствий простейшей вимп-модели и астрономических наблюдений, предпочтительными становятся модели многосоставной темной материи. В таких моделях наличие большого количества свободных параметров позволяют более точно согласовывать теории и наблюдения. Такой подход более естественен и исходя из разнообразия обычной материи.

Критика такого подхода заключается в постоянном усложнении моделей, подобно существовавшей некогда громоздкой теории эпициклов для объяснения движения планет. Тем не менее в настоящий момент сама гипотеза существования темной материи позволяет объяснять многие космологические проблемы, и нет причин считать, что темная материя обязана обладать простейшей формой наподобие вимп-частиц.

Парадоксальность ситуации заключается в том, что существование темной материи практически не подвергается сомнению, но ее состав до сих пор совершенно не известен. Пока не найдена разгадка, нужно быть готовыми к любому из множества пусть даже самых экзотических объяснений, в том числе и к тому, что мы живем рядом с параллельным невидимым миром. Быть может, ученые этого параллельного мира тоже скептически размышляют о нашем существовании? ■

Перевод: О.С. Сажина

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Тродден М., Фэн Д. Темные миры // ВМН, № 1, 2011.
- Dark Matter and Dark Radiation. Lotty Ackerman et al. in *Physical Review D*, Vol. 79, No. 2, Article No. 023519; January 23, 2009.
- Atomic Dark Matter. David E. Kaplan et al. in *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Vol. 2010, No. 5, Article No. 021; May 19, 2010.
- Dark-Disk Universe. JiJi Fan et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 110, No. 21, Article No. 211302; May 23, 2013.
- The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter. Katherine Freese. Princeton University Press, 2014.

# Послания черных дыр

Чудом кажется не только то, что удалось напрямую услышать гравитационные шумы Вселенной, но и сам факт, что такой слабый шум вообще можно услышать

Давным-давно, 1 млрд 300 млн лет тому назад, в месте, удаленном отсюда на 1 млрд 300 млн световых лет, столкнулись две черные дыры. Были они относительно невелики и по массе превышали Солнце соответственно в 39 и 26 раз. Вращаясь друг относительно друга с огромной скоростью и затрачивая на один оборот по несколько миллисекунд, они наконец слились, издав «гравитационный вопль» с энергией трех Солнц.

14 сентября прошлого года этот вопль в сильно ослабленном виде достиг Земли, растянув размеры в одном направлении и сжав их в другом, перпендикулярном первому. Это изменение, измеряемое всего лишь десятитысячными долями от радиуса протона, сумели зарегистрировать расположенные в США детекторы обсерватории *LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) — это был сигнал в звуковом диапазоне, длящийся пятую долю секунды и нарастающий по амплитуде и частоте. Чудом кажется уже не только то, что ученым удалось подтвердить сделанные 100 лет назад предсказания Альберта Эйнштейна и напрямую услышать гравитационные шумы Вселенной, но и сам факт, что такой слабый шум вообще можно услышать.

— Но это, конечно, не чудо, — заявил в разговоре с представителем нашего журнала член-корреспондент РАН Александр Михайлович Сергеев, директор нижегородского Института прикладной физики РАН, команда из которого принимала участие в создании гравитационной обсерватории, — а удивительный результат работы более чем тысячи ученых и специалистов со всего света, четверть века подряд пытавшихся добиться такой чувствительности. Я бы сравнил эти попытки с попытками человека, находящегося в шумном





Для строительства обсерватории *LIGO* ученые выбрали два очень тихих места: одно в штате Вашингтон, на заброшенном ядерном полигоне, второе в Луизиане, среди тропических и субтропических лесов

вагоне, слышать то, что говорит ему собеседник по мобильному телефону. Сначала он уходит туда, где потише, в тамбур например, а потом, если и это не помогает, вообще выходит из вагона, ищет место, где как можно меньше посторонних шумов... Если связь плохая, ему будет нужен телефонный аппарат, который сам не шумит. Дальше по отдельным доносящимся звукам он попытается угадать смысл сказанного. Если собеседник иностранец, он ничего не поймет, а если соотечественник, да еще родственник, чей словарь и чьи интонации хорошо знакомы, он с большей вероятностью разберет телефонное послание. Именно по такому сценарию и шло строительство детекторов обсерватории *LIGO*.

**— И что представлял собой этот сценарий?**

— Напомню прежде историю создания *LIGO* — это позволит понять дальнейшее. Идея создать такую обсерваторию обрела жизнь в США в начале 1990-х гг. Именно в эти годы американцы закрыли у себя строительство суперколлайдера нового поколения с параметрами, превосходящими тот, который потом построили в Европе объединенными усилиями многих стран. Дороговизна проекта и массовые протесты налогоплательщиков привели к такому отказу, но вместо него на первый план вышло строительство другой суперустановки,

которая, используя метод лазерной интерферометрии, могла бы улавливать неуловимые прежде гравитационные волны. И этот проект оказался самым крупным проектом из реализованных Национальным научным фондом США за всю историю его существования.

Теоретически эта идея была известна давно, еще в 1960-е гг. ее озвучили сначала наши теоретики М.Е. Герценштейн и В.И. Пустовойт, потом появились и американские работы, однако долгое время она была практически неосуществима. Не хватало многого, прежде всего лазерных технологий, а также материаловедческих, способных обеспечить нужные материалы для оптических элементов нужного качества и многого другого. И только к 1990-м гг. технологии дошли до такого уровня, что можно было хотя бы попробовать. Так возникла идея установки *LIGO*, которая, может быть, и не была способна зарегистрировать гравитационные волны, но с ней по крайней мере можно было бы понять, как двигаться дальше.

Идея заключалась в том, чтобы использовать характерное свойство гравитационной волны изменять метрику пространства особым образом — расширять ее в одном направлении и сжимать в ортогональном. Эту разницу могут почувствовать две световые волны, распространяющиеся



перпендикулярно друг другу. В грубом приближении это должно было выглядеть так: луч лазера разбивается на два перпендикулярных друг другу луча, и они начинают бегать между своими зеркалами, встречаясь в приемнике и интерферируя между собой. Гравитационная волна меняет интерференционную картину, что уже может быть зафиксировано.

Итак, следуя «телефонному» сценарию, американцы для начала выбрали два самых тихих места для своих детекторов — одно в штате Вашингтон, на заброшенном ядерном полигоне на границе с штатом Орегон, а второе в Луизиане, где в краю тропических и субтропических лесов можно было найти тихий уголок. Дальше требовалось сделать так, чтобы шумы детектора не заглушали полезного сигнала. Природа по какой-то случайности устроена так, что самым «бесшумным» диапазоном для *LIGO* оказался диапазон, который воспринимает человеческое ухо, — 10–1000 Гц. Поэтому с помощью этой обсерватории можно в буквальном смысле слова услышать гравитационные волны. И, что очень важно, требовались стабильные и очень мощные лазеры, которые появились только к 1990-м гг. Еще требовалось выделить из всего многообразия космических шумов этого диапазона те, которые вызываются

## Сигнал с постепенно увеличивающимися частотой и амплитудой был одновременно зафиксирован на двух антеннах *LIGO* в Вашингтоне и Луизиане

гравитационными волнами. Здесь уже потребовались знания теоретиков. По их расчетам оказалось, что гравитационный всплеск от слияния двух крупных звезд или черных дыр должен порождать очень характерный сигнал с постепенно увеличивающимися частотой и амплитудой, а затем идет резкий обрыв. Такого типа сигнал и был практически одновременно зафиксирован на двух антеннах *LIGO* в Вашингтоне и Луизиане.

— **Каким был российский вклад в *LIGO*?**

— Там работали только две российские группы — мы и группа из МГУ под руководством члена-корреспондента РАН В.Б. Брагинского. Сейчас он по возрасту от проекта отошел, его сменил профессор В.П. Митрофанов. На *LIGO* работали, приезжая и уезжая, исследователи из нашего института общим числом около 20 человек. Ключевую роль в этом сотрудничестве играет член-корреспондент РАН Е.А. Хазанов. В этом году от нас в проекте работают восемь человек. Если говорить про нижегородский



Изолятор Фарадея для *LIGO*

вклад, мы были приглашены в коллаборацию из-за того, что наш институт был и остается одним из мировых лидеров в разработке мощных лазерных систем и оптических элементов для них. Один из таких элементов, обеспечивающий развязку лазерного источника и интерферометра, называется изолятором Фарадея. Не буду вдаваться в описание этих систем, скажу только, что без них *LIGO* не смог бы функционировать. Наш институт много сделал и по другим вопросам. Например, мы получили несколько грантов от американского Национального научного фонда на разработку приборов для дистанционного контроля поверхностей *LIGO*.

В условиях сильного радиационного воздействия мощного лазерного излучения поверхности зеркал интерферометра могут «состариться», поэтому такой контроль попросту необходим. Московская группа, принимавшая участие в создании *LIGO*, — специалисты по очень чувствительным измерениям и регистрации квантовых шумов. Их участие, например, требовалось, когда надо было решать, из какого материала делать зеркала, из чего должны быть нити, на которых они подвешены, — по их совету вместо предполагаемого сапфира эти нити сделали из кварца, потому что сапфир, как они доказали, больше «хрустит» и вносит ненужный шум. Эта группа воспитана, как я уже сказал, Владимиром Борисовичем Брагинским. Он выдающийся ученый и в *LIGO* чрезвычайно уважаемый человек. С тех пор как около 20 лет назад мы начали сотрудничать с *LIGO*, мне часто приходилось слышать, что работа группы Брагинского очень важна.

Вклад России в успех *LIGO* без сомнения меньше, чем ее вклад в поимку бозона Хиггса. Причин тому несколько. Во-первых, на уровне российских агентств и министерства эти работы целенаправленно не поддерживались в отличие от сотрудничества с *CERN*. Вторая причина в том, что создание *LIGO* началось в смутную для нас пору, когда большинство наших лабораторий думали не столько о том, как детектировать гравитационные волны, сколько просто о том, как выжить. Мы-то оказались



востребованы в *LIGO* потому, что у нас большая лазерная и оптическая культура и этим мы были известны в научном мире. Группа В.Б. Брагинского оказалась там тоже потому, что ее хорошо знали задолго до этого, а новичков в то время просто не оказалось. Есть несколько академических институтов, которые заняты схожими проблемами, но они больше ориентированы на Европу — на итальянский аналог американской гравитационной обсерватории под названием *VIRGO*.

**— Что вы для себя получили из опыта работы в *LIGO*?**

— Опыт работы в коллаборации *LIGO* был огромен. Команда очень интересная, сильная, о каждом из ее лидеров я мог бы с удовольствием говорить часами. Они находятся каждый в своем университете, но ежедневно встречаются в Интернете, активно общаются между собой. Американцы молодцы, они очень хорошо построили работу коллаборации. И знаете, эти две черные дыры, которые когда-то там столкнулись и послали сигнал, нами услышанный, они передали нам — я имею в виду Россию — несколько очень важных посланий.

Первое послание сводится к тому, что надо вкладывать деньги в крупные установки. Современное фундаментальное знание становится все более дорогим и глубоким. Требуется все более сложный инструментарий, особенно это видно в физике. Мы должны принять как факт, что через некоторое количество лет практически все фундаментальное знание будет генерироваться на больших установках типа *LIGO* или Большого адронного коллайдера, все остальное будет плестись в хвосте. Потому что если вы сделали инструмент с лучшими характеристиками, чем остальные, вы увидите явления, которых другие не увидят, и вы начинаете пожирать плоды этого превосходства. Только там это знание может быть получено, а поскольку его нужно «вытаскивать» из все больших глубин, его можно получать только в крупных исследовательских инфраструктурах. Это и есть фабрики фундаментального знания.

**— У нас таких нет?**

— Почему же? Лет пять назад правительственная комиссия приняла решение о том, что в России должно быть построено шесть новых исследовательских инфраструктур. Они называются у нас установками класса «мегасайенс». Они были отобраны на основе конкурса, как было сказано, что мы их построим в течение десятилетия, но частично из-за неблагоприятной экономической ситуации, частично из-за реформирования, которое сейчас идет в науке, фактически сейчас из этих шести проектов финансируются два — и то с очень большим трудом. Достраивается реактор нейтронов в Гатчине. Сейчас начинается второй проект — строительство в Дубне ускорителя тяжелых ионов. С остальными худо, несмотря на то что они одобрены на самом высшем уровне.

В это время в США и Европе (особенно в Европе) есть программы по созданию более трех десятков таких исследовательских инфраструктур. И все это по стоимости установки класса *LIGO*.

Второе послание черных дыр состоит в том, что нельзя допускать разнесения центра управления наукой и центра компетенции. Я понимаю, у России как у государства есть свои приоритеты в науке, определяемые людьми пусть очень умными, но не учеными. Только ученый знает, в чем он действительно силен и на какие проекты нужно направлять основные силы. Если бы вы пришли в наше научное агентство или министерство, скажем, в январе, и потребовали бы сделать одним из главных приоритетов лазерный типа *LIGO*, там покрутили бы пальцем у виска и попросили



Директор нижегородского Института прикладной физики РАН член-корреспондент РАН А.М. Сергеев

бы вас больше их таким безумием не тревожить. Если бы вы с тем же пришли сейчас, после пресс-конференций по всему миру, рассказавших о гравитационном успехе Америки, реакция могла бы быть совершенно иной.

Я упоминал, что некоторые наши работы мы вели на гранты Национального научного фонда США. Частично мы финансировались из собственного базового бюджета академической организации. Если бы этого бюджета у нас не было, не было бы в *LIGO* и нас. А сейчас это базовое финансирование у академических институтов собираются отобрать, полностью заменив его конкурсным. И это будет беда, последствия которой предстоит трудное. Политика государства в отношении науки должна быть направлена не только на то, что сегодня, по мнению чиновников, нужно государству, но и на то, чтобы давать ученым самим определять, над чем работать и что может завтра оказаться крупнейшим научным открытием, которое никак не поместить в сегодняшние приоритеты. ■

Беседовал Владимир Покровский







**НЕЙТРИНО**



**НА**



**КРАЮ**



**АСТРОФИЗИКА**



**СВЕТА**

Десятки космических частиц оказались пойманными в эксперименте *IceCube* на Южном полюсе. Информация, принесенная этими гостями с другого конца Вселенной, поможет решить многие загадки космоса

Фрэнсис Халзен

## ОБ АВТОРЕ

**Фрэнсис Халзен** (Francis Halzen) — исследователь в области физики частиц, астрофизики и космологии. Работает в Висконсинском университете в Мадисоне. Руководитель проекта *IceCube*.



**I**ceCube — это один из наиболее ярких и амбициозных проектов, стартовавший в 2010 г. на Южном полюсе. *IceCube* представляет собой гигантский детектор частиц в толще полярных льдов, предназначенный для ловли нейтрино — частиц, обладающих высокими энергиями, которые мало взаимодействуют с веществом, свободно проходя практически сквозь все, что встречается на пути. Исследование нейтрино важно для понимания процессов в далеком космосе, в том числе процессов рождения жестких космических лучей — высокоэнергетических заряженных частиц, постоянно бомбардирующих Землю.

Ожидается, что *IceCube* сможет обнаруживать высокоэнергетические нейтрино довольно редко. Масса нейтрино чрезвычайно мала, они не несут электрического заряда (поэтому-то они почти не взаимодействуют с другими частицами) и летят с околосветовыми скоростями. Прибыв на Землю — издалека или из ближнего космоса, — большинство из них не задерживаются. Нейтрино продолжают путешествие, не сбившись с маршрута, прямо сквозь Землю. Если принимать во внимание такие свойства этих частиц, то нет ничего удивительного в том, что в первые несколько лет работы детектора, когда он был еще на стадии тестирования и доработок, ничего особенно интересного не было обнаружено. Однако в 2012 г. ситуация изменилась.

Однажды во время обычной видеоконференции между членами научной команды *IceCube* рабочие экраны компьютеров озарились вспышками, которые никогда раньше не наблюдались. Это были сигналы, порожденные двумя нейтрино с энергиями, более чем в тысячу раз превышающими энергии

нейтрино, когда-либо полученные на земном ускорителе, и почти в миллиард раз превышающими энергию солнечных нейтрино. Очевидно, они были рождены в каких-то процессах, происходивших вдали от нашей планеты и сопровождавшихся мощными выбросами энергии. Событие действительно оказалось экстраординарным: пришедшие в возбуждение исследователи по предложению одного из аспирантов тут же окрестили частицы именами двух забавных кукол из международной детской программы «Улица Сезам» — Влас и Еник. Идея оказалась не только смешной, но и отчасти полезной, потому что имена легче запомнить, чем длинные строки цифр, обычно характеризующие события регистрации нейтрино.

Потребовались год работы и полная переработка методики анализа данных, чтобы исследователи полностью поверили в то, что они увидели: первые элементы изображения (так называемые пиксели) далекой нейтринной Вселенной. С тех пор было зарегистрировано в общей сложности 54 высокоэнергетических нейтрино, и многие получили имена других кукольных персонажей «Улицы Сезам» — например, одно из них, энергия которого вдвое превышала показатель для Власа и Еника, окрестили Большой Птицей.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- *IceCube* — детектор нейтрино, расположенный во льдах на Южном полюсе. Как правило, нейтрино свободно проходят сквозь вещество, не взаимодействуя с ним, но иногда при контакте с ядрами атомов льда нейтрино порождают потоки светящихся частиц, которые *IceCube* может обнаруживать.
- Этот ледяной детектор зафиксировал десятки высокоэнергетических нейтрино, большинство из которых предположительно пришли из дальних уголков Вселенной.
- Такие космические нейтрино могут помочь восстановить траекторию своего путешествия, указав, таким образом, во Вселенной области экстремально высокого энерговыделения. Подобные области могут служить источниками космических лучей сверхвысоких энергий, бомбардирующих Землю.



Поймав нейтрино, исследователи задались вопросом, с какого участка неба они прибыли и какие процессы их породили. Кандидаты на роль колыбели таких частиц — это экстремальные по количеству выделенной энергии объекты, такие как сверхновые или другие типы взрывающихся звезд, для которых характерны мощные всплески гамма-излучения. И те и другие порождают космические лучи сверхвысоких энергий. Важно суметь проследить путь высокоэнергетического нейтрино до вероятных источников космических лучей, что позволит лучше понять физическую суть грандиозных космических событий.

### Мощные частицы

Космические лучи, которые постоянно бомбардируют Землю из космоса, представляют собой протоны экстремально высоких энергий и другие заряженные частицы. Прошло более полувека после их открытия. Однако физические процессы, порождающие эти частицы, до сих пор неизвестны. Нет возможности указать ту область на небе, откуда частицы прибывают на Землю, потому что из-за наличия электрического заряда они отклоняются галактическими и межгалактическими магнитными полями. К счастью, согласно теории, космические лучи в месте своего рождения взаимодействуют с фотонами, порождая нейтрино.

Нейтрино в отличие от космических лучей способны указать, откуда прилетели. Это происходит потому, что нейтрино индифферентны ко всему остальному веществу и практически ничто не может исказить их траекторию движения. Таким образом, хотя сами по себе космические лучи не могут привести нас к своему источнику, высокоэнергетические нейтрино, порождаемые космическими лучами, могут это сделать за них.

У астрономов, конечно, есть гипотезы о том, как возникают космические лучи. Однако для проверки, какая из них более жизнеспособна, необходимы реальные наблюдательные данные. Один из возможных источников космических лучей — массивные звезды, находящиеся на финальной стадии эволюции. Звезды живут долго и на протяжении всей жизни поддерживают устойчивость благодаря балансу внутренних ядерных сил и сил гравитационного сжатия, но наступает период, когда все внутреннее ядерное топливо выгорает и больше не может противодействовать сжимающим звезду гравитационным силам. Происходит коллапс звезды в сверхплотную нейтронную звезду или даже в еще более плотную конфигурацию — черную дыру, от которой ничто не может ускользнуть. Кроме ярчайшей вспышки сверхновой при коллапсе (предположительно посредством ударных волн) происходит преобразование гравитационной энергии в энергию для разгона частиц. Еще в 1934 г. остатки сверхновых звезд были



*Ушедший на 1,5 км под ледяной панцирь Антарктиды детектор IceCube состоит из 86 гирлянд датчиков, протянутых сквозь кубический километр льда. Каждую гирлянду опускали в соответствующее отверстие, просверленное с помощью горячей воды.*

предложены астрономами Вальтером Бааде (Walter Baade) и Фрицем Цвикки (Fritz Zwicky) в качестве вероятных источников космических лучей. Прошло 80 лет, а это предположение до сих пор остается всего лишь обсуждаемой гипотезой. Взрывы каждые 100 лет трех сверхновых (преобразующих некоторую часть своих масс в «топливо для разгона» частиц) достаточно для объяснения наблюдаемого устойчивого потока космических лучей.

Внегалактические космические лучи, приходящие из-за пределов Млечного Пути, обладают, как правило, энергиями, превышающими энергии космических лучей от близких источников. Следовательно, внегалактические космические лучи требуют более высокоэнергетических источников для рождения. Один из претендентов — это всплески гамма-излучения. Будучи даже ярче обычных сверхновых, гамма-всплески во многом загадочны, хотя с большой вероятностью порождаются процессами коллапса некоторых звезд, обладающих сверхбольшими массами и оказавшихся в экстремальных внешних условиях.

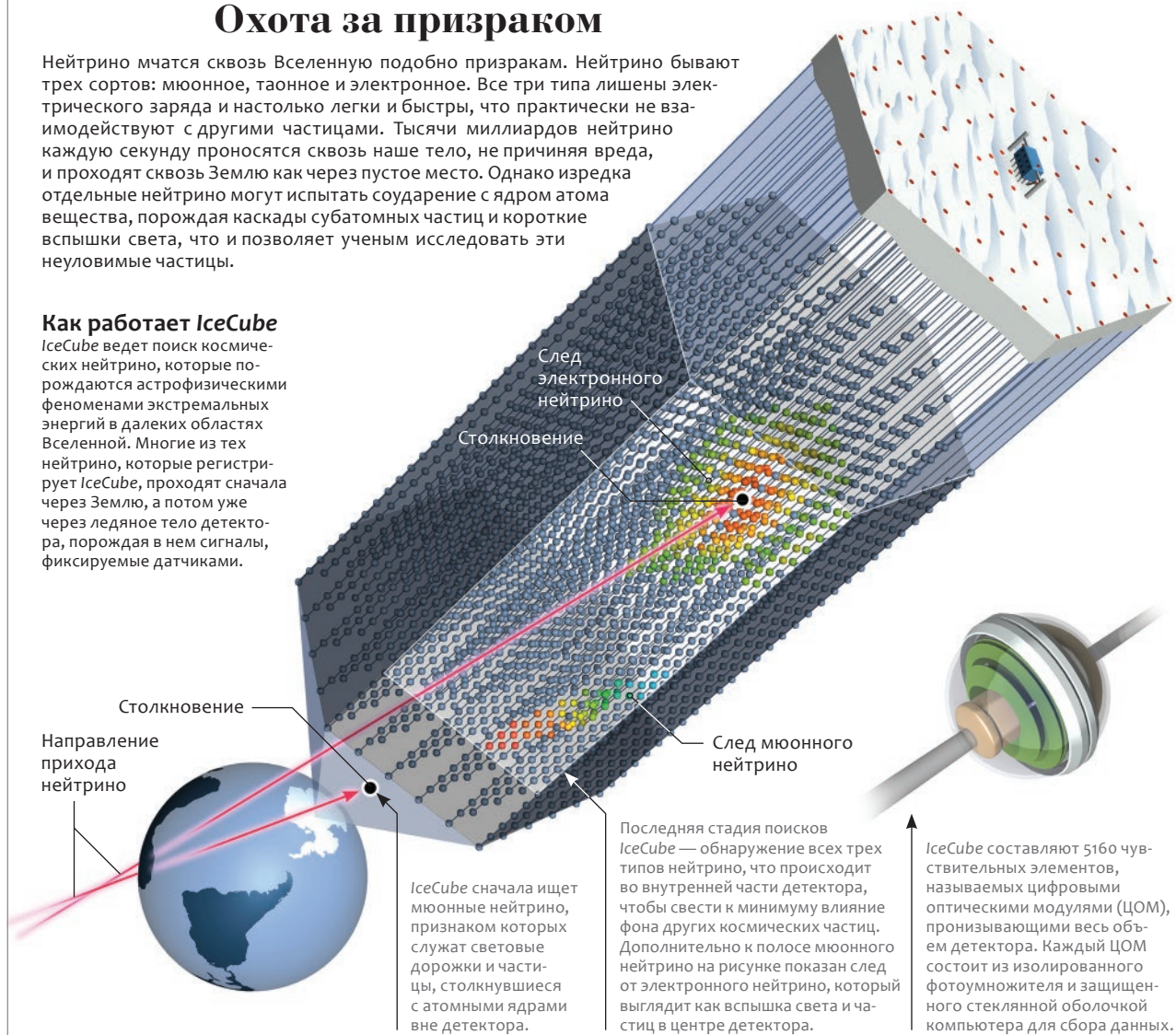
Еще одним теоретическим источником внегалактических космических лучей могут служить ядра активных галактик — таких галактик, в центре

## Охота за призраком

Нейтрино мчатся сквозь Вселенную подобно призракам. Нейтрино бывают трех сортов: мюонное, таонное и электронное. Все три типа лишены электрического заряда и настолько легки и быстры, что практически не взаимодействуют с другими частицами. Тысячи миллиардов нейтрино каждую секунду пронесаются сквозь наше тело, не причиняя вреда, и проходят сквозь Землю как через пустое место. Однако изредка отдельные нейтрино могут испытать соударение с ядром атома вещества, порождая каскады субатомных частиц и короткие вспышки света, что и позволяет ученым исследовать эти неуловимые частицы.

### Как работает IceCube

*IceCube* ведет поиск космических нейтрино, которые порождаются астрофизическими феноменами экстремальных энергий в далеких областях Вселенной. Многие из тех нейтрино, которые регистрирует *IceCube*, проходят сначала через Землю, а потом уже через ледяное тело детектора, порождая в нем сигналы, фиксируемые датчиками.



*IceCube* сначала ищет мюонные нейтрино, признаков которых служат световые дорожки и частицы, столкнувшиеся с атомными ядрами вне детектора.

Последняя стадия поисков *IceCube* — обнаружение всех трех типов нейтрино, что происходит во внутренней части детектора, чтобы свести к минимуму влияние фона других космических частиц. Дополнительно к полосе мюонного нейтрино на рисунке показан след от электронного нейтрино, который выглядит как вспышка света и частиц в центре детектора.

*IceCube* составляют 5160 чувствительных элементов, называемых цифровыми оптическими модулями (ЦОМ), пронизывающими весь объем детектора. Каждый ЦОМ состоит из изолированного фотоумножителя и защищенного стеклянной оболочкой компьютера для сбора данных.

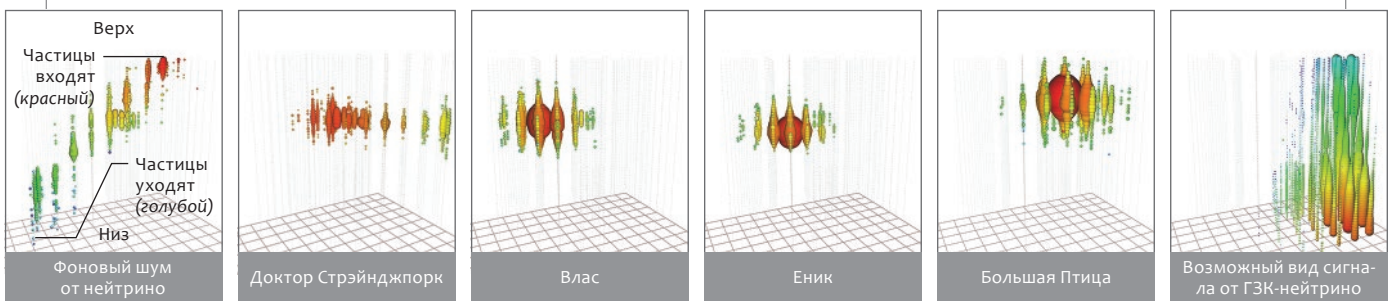
### Что мы увидели и что мы до сих пор пытаемся найти

Большинство зарегистрированных *IceCube* нейтрино представляют собой «фоновый шум» от процессов в атмосфере Земли. У таких нейтрино низкие энергии, и создаваемые ими ливни вторичных частиц (рис. внизу слева) регистрируются с интенсивностью 3 тыс. событий в секунду.

Космические нейтрино могут прийти с любой стороны — даже пройдя сквозь Землю. Мюонные нейтрино («доктор Стрэйнджпork», внизу) проявляют себя длинными полосами, тогда как электронные или таонные нейтрино появляются в виде световых вспышек и частиц («Влас», «Еник» и «Большая Птица», внизу).

*IceCube* все еще находится в поиске характерных световых полос или вспышек от высокоэнергетических ГЗК-нейтрино. Такие нейтрино должны обладать энергиями в тысячу раз большими, чем энергии всех остальных космических нейтрино.

Низкая энергия ← → Высокая энергия



SOURCE: COURTESY OF ICECUBE COLLABORATION (bottom six panels); Illustration by George Retseck



которых находится сверхмассивная черная дыра, поглощающая огромные количества вещества. При аккреции (падении) вещества на сверхмассивную черную дыру возникают высокоскоростные струи вещества, направленные от черной дыры, которые могут стать космическими лучами.

### Поймать нейтрино

Высокоэнергетические процессы в космосе порождают космическое излучение, которое в свою очередь становится «поставщиком» нейтрино. Для регистрации нейтрино *IceCube* должен обладать очень большими размерами. И действительно, этот эксперимент использует кубический километр антарктического льда возрастом 100 тыс. лет, находящийся на глубине 1,5 км на Южном полюсе. Лед — превосходный природный детектор нейтрино. При очень редких событиях взаимодействия нейтрино с ядрами атомов льда происходит вспышка, распадающаяся на ливень заряженных частиц, светящихся голубым светом. Это так называемое черенковское излучение проходит сотни метров сквозь чистый сверхпрозрачный лед. *IceCube* оснащен 5160 оптическими сенсорами, распределенными по всему объему ледяного куба для обнаружения такого излучения.

Датчики позволяют уловить в мельчайших деталях распределение свечения, которое появляется вследствие прохождения нейтрино. С помощью таких следов можно определить не только тип (или «аромат») пришедшего нейтрино, но и его энергию и направление прихода. Энергии Власа и Еника, а также других нейтрино, которые удалось таким образом наблюдать, оказались огромными, никогда раньше не регистрируемыми — порядка петаэлектронвольта (ПэВ), или  $10^{15}$  эВ: для Еника — 1,09 ПэВ, для Власа — 1,24 ПэВ. Сравните: пучки частиц, исследуемые на самом мощном в мире ускорителе заряженных частиц Большом адронном коллайдере (БАК), обладают энергиями порядка тераэлектронвольта (ТэВ), т.е.  $10^{12}$  эВ. Энергетические возможности БАК на три порядка ниже, чем у *IceCube*. Световые вспышки примерно 100 тыс. фотонов, порожденных Власом и Еником, протягиваются более чем на 500 м.

Важно отметить, что энергии Власа и Еника порядка 1 ПэВ сигнализируют о том, что эти частицы обязательно должны быть частью какого-то космического сигнала. Для близлежащих источников энергетическая шкала сигнала слишком высока. Местных нейтрино полным-полно: каждые шесть минут *IceCube* детектирует нейтрино, образовавшееся при взаимодействии космических лучей с водородом и кислородом земной атмосферы. Но эти частые гости, будучи рожденными очень близко от нас, совершенно бесполезны в качестве источников информации о космических лучах или природе астрофизических явлений. Не следует

вообще уделять им внимание, поскольку они досконально изучены в других экспериментах.

Таким образом, можно быть совершенно уверенными, что высокоэнергетические нейтрино, регистрируемые *IceCube*, приходят из дальнего космоса. И приходят они из тех же источников, что и космические лучи. Однако возможны и более экзотические варианты объяснения происхождения таких нейтрино. Например, они могут быть следами темной материи, не видимого телескопами типа вещества, составляющего более 80% всего вещества Вселенной. Это предположение выглядело бы реалистично, если бы темная материя состояла из очень тяжелых частиц со средним временем жизни, превышающим возраст Вселенной. В таком сценарии частицы темной материи могли бы иногда распадаться, производя нужное (очень небольшое) количество наблюдаемых высокоэнергетических нейтрино.

### Подсчитывая нейтрино

До открытия нейтрино с энергиями порядка 1 ПэВ проект *IceCube* был ориентирован почти исключительно на поиски космических нейтрино определенного аромата — так называемых мюонных нейтрино (всего известно три типа, или аромата, нейтрино: мюонное, электронное и таонное). Считается, что нейтрино всех трех типов приходят на Землю в равных пропорциях, но некоторые из них легче обнаружить по производимым ими сигналам на детекторе. Изначально *IceCube* был оптимизирован для поиска мюонных нейтрино, сталкивавшихся с ядрами атомов в основном за пределами границ детектора, порождая световые следы километровой длины, которые могли тянуться через весь объем детектора. Технология регистрации позволила существенно расширить области «сбора» нейтрино, увеличив рабочий объем до размеров, превосходящих сам детектор. Однако при этом увеличилась и степень «загрязнения» данных посторонними частицами, отличными от космических нейтрино. Пришлось применять дополнительные меры для возможности отсеивать нужные сигналы на паразитном фоне.

Параллельно шли и другие исследования, ориентированные на поиск специального класса нейтрино, обладающих экстремально большими энергиями, так называемых нейтрино Грайзена — Зацепина — Кузьмина (ГЭК-эффект). Такие нейтрино рождаются при взаимодействиях космических лучей и фотонов микроволнового реликтового излучения. (Напомним, что микроволновое реликтовое излучение — это излучение порядка 3К самых первых фотонов, которые стали распространяться свободно в ранней горячей Вселенной, прошедшей состояние плазмы. — Примеч. пер.) ГЭК-нейтрино способны достигать колоссальных энергий порядка эксаэлектронвольт (ЭэВ), или  $10^{18}$  эВ.

## ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Существует несколько международных экспериментов по поиску и исследованию космических лучей сверхвысоких энергий. К наиболее известным по важности полученных данных следует отнести массив телескопов *Telescope Array*, состоящий из 507 детекторов частиц общей площадью порядка 700 км<sup>2</sup>, расположенный в штате Юта (США). В 2014 г. было сообщено об открытии космических лучей с энергиями порядка 57 ЭэВ, а также была локализована область на небе, откуда они приходят. Отметим и космический эксперимент «Мушиный глаз высокого разрешения» (*HiRes, High Resolution Fly's Eye*) по исследованию ГЗК-эффекта. Измеренные энергии космических лучей составляют величину порядка 60 ЭэВ (2006). Еще следует упомянуть результаты Обсерватории Пьера Оже (*PAO, Pierre Auger Observatory*), независимо подтвердившие регистрацию космических лучей сверхвысоких энергий указанного порядка.

Поиск ГЗК-нейтрино происходил в ограниченной части *IceCube*, в его внутренней половине, оставляя меньше возможностей для шумовых вкладов. Преимущество такого ограничения в том, что становится возможным измерять полную энергию каждого нейтрино с точностью 10–15%. Это существенное улучшение измерений по сравнению с теми, которые проводятся вне детектора. На *IceCube* ГЗК-нейтрино пока не обнаружены, зато удалось найти множество нейтрино всех трех типов.

Со времен открытия нейтрино Власа и Еника было обнаружено много космических нейтрино тем же самым методом и методом по поиску мюонных нейтрино. В первый год были детектированы 26 нейтрино с энергиями от 30 до 1,2 тыс. ТэВ, что в сумме с Власом и Еником составило 28 штук. Такое количество значимо превосходит (говоря языком математической статистики, «на четыре стандартных отклонения») допустимые отклонения от всех возможных событий по регистрации атмосферных нейтрино, что означает высокую вероятность (больше 99,9%) прихода этих частиц именно из глубокого космоса. Второй год наблюдений пополнил список «гостей». Суммарное количество нейтрино за два года составило 54, что увеличило статистическую значимость сигнала до пяти стандартных отклонений, а это с точки зрения математической статистики говорит об «открытии», т.е. об уверенном обнаружении сигнала от космических нейтрино.

Где же именно были рождены все эти высокоэнергетические нейтрино? Имеющиеся на сегодняшний момент события обнаружения нейтрино, к сожалению, пока дают не слишком репрезентативную выборку. Другим словами, пока таких нейтрино слишком мало для убедительного ответа

на поставленный вопрос. Похоже, место их обитания не ограничивается нашей Галактикой. На карте неба, где прочерчены их траектории, наблюдаются только незначительные совпадения направлений прибытия с плоскостью Галактики. Большая часть нейтрино приходят с направлений, далеких от плоскости Галактики, и, скорее всего, имеют внегалактическое происхождение. Тем не менее есть отдельные превышения среднего числа нейтрино, приходящих от плоскости Галактики. Влас, по-прежнему один из самых высокоэнергетических отловленных нейтрино, испущен из направления в пределах одного градуса от центра Галактики. Нельзя сказать наверняка, в чем причина высокоэнергетических процессов в этой области неба, однако вполне точно известно, что в центральных областях Галактики довольно близко друг от друга содержатся остатки сверхновых, а кроме того, гигантская черная дыра. Таким образом, возможных источников высокоэнергетических нейтрино в такой густонаселенной области довольно много.

Ученые надеются получить более полное представление о месте образования нейтрино с помощью планомерного сбора информации о достигающих Земли мюонных нейтрино. В ледяном детекторе эти частицы показывают себя светящимися линиями километровой длины, и поэтому направление их прихода может быть восстановлено с точностью выше 0,50. Полученная карта всех траекторий может показать, откуда идут космические лучи. Если эти направления пересекутся с направлениями на известные объекты на небе, яркие галактики, содержащие активные ядра или вспышки гамма-излучения, то, возможно, удастся выявить источники космических лучей.

*IceCube* еще только начал работу: его ориентировочные сроки эксплуатации — 20 лет или более. Однако уже сейчас ученые задумываются о его «сиквеле». Речь идет о детекторе будущего, объем которого в десять раз превысит объем существующего *IceCube*. Чем больше детектор, тем больше нейтрино он сможет поймать. Большие количества регистрируемых событий позволят указать, откуда прибыли они сами и породившие их космические лучи. ■

Перевод: О.С. Сажина

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Вейлер Т., Джелмини Г., Кузенко А. Глазами нейтрино // ВМН, №7, 2010.
- Detection of the Free Neutrino: A Confirmation. C.L. Cowan, Jr., et al. in *Science*, Vol. 124, pages 103–104; July 20, 1956.
- Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data. M. G. Aartsen et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 113, No. 10, Article No. 101101; September 5, 2014. Статья доступна по адресу: <http://arxiv.org/abs/1405.5303>





ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ

# Научная Россия

<http://scientificrussia.ru>



[www.sciam.ru](http://www.sciam.ru)