

АСТРОНОМИЯ

# Весь СВЕТ во Вселенной

*Галактики, зародившиеся когда-то в разных уголках Вселенной, испускали фотоны в течение всего времени своего существования. Сегодня астрономы начинают разбираться в информации, которую несет этот фоновый межгалактический свет*

**Труди Белл, Альберто Домингес и Джоэл Прима**







ОБ АВТОРАХ

**Труди Белл** (Trudy E. Bell) — бывший редактор журналов *Scientific American* и *IEEE Spectrum*, автор десятка книг.

**Альберто Домингес** (Alberto Dominguez) — научный сотрудник кафедры физики и астрономии Университета Клемсона. Занимается изучением эволюции галактик и космологией.

**Джоэл Примак** (Joel R. Primack) — почетный профессор физики Калифорнийского университета в Санта-Крузе. Круг интересов — космология, темная материя.



# Почему ночью небо темное?

Если Вселенная состоит из миллиардов галактик и каждая из них населена миллиардами звезд, которые в течение миллиардов лет испускали фотоны, то почему она не залита светом? Немецкий астроном Вильгельм Ольберс (Wilhelm Olbers, 1758–1840) задумался над этим в 1820-х гг., а загадка получила название парадокса Ольберса, или фотометрического парадокса. Еще древние астрономы и философы удивлялись, почему небо темное, и задавались вопросом, не стоит ли за этой темнотой тайна эволюции Вселенной. Эти ученые мужи были настоящими провидцами!

На самом деле во вселенской тьме больше света, чем нам кажется. Даже в глубоком космосе, вдали от звезд Млечного Пути, межгалактическое пространство не абсолютно черное. Оно светится благодаря так называемому рассеянному внегалактическому фоновому излучению (ВФИ). Это излучение состоит из фотонов, испущенных всеми когда-либо существовавшими звездами и галактиками, и представлено светом всех длин волн — от ультрафиолетового до инфракрасного. Свет удаленных галактик очень слаб, поскольку межгалактическое пространство огромно и в этих масштабах в нем не так уж много светящихся

галактик (или тех, которые светились когда-то). Поскольку Вселенная расширяется, фотоны, испущенные галактиками за всю ее историю, разлетались по всему космическому пространству и постепенно разредились. Кроме того, в результате расширения свет от далеких галактик претерпевал красное смещение — длина его волны увеличивалась, перемещаясь в невидимую для глаза область электромагнитного спектра.

Наблюдать внегалактическое фоновое излучение напрямую невозможно вследствие высокой яркости современных звезд и галактик. Но в 2012–2013 гг. группа астрофизиков (в том числе двое из нас,

## ! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

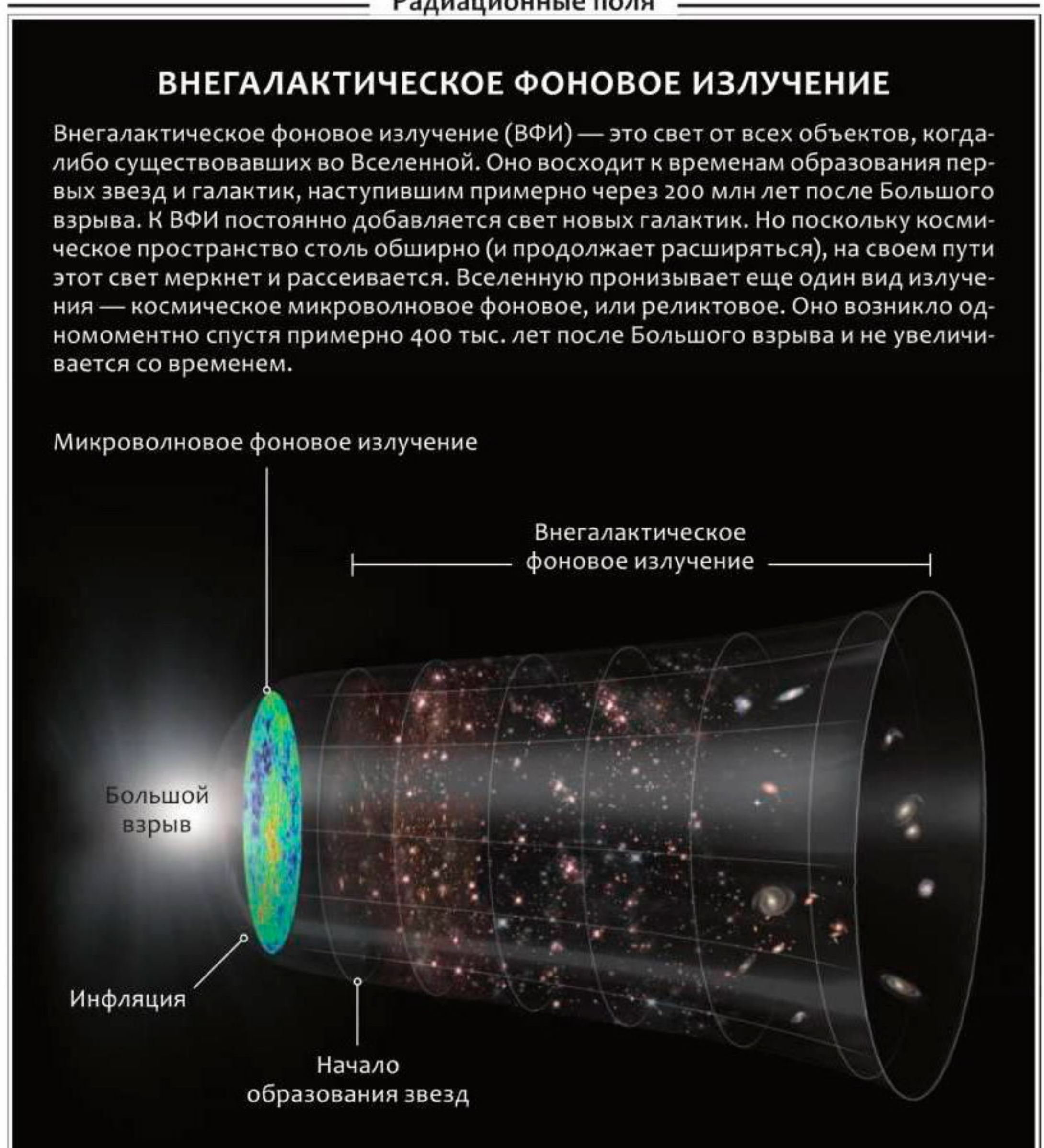
- Ночное небо, кажущееся нам темным, на самом деле наполнено светом галактик, образовавшихся на протяжении всей истории существования Вселенной.
- Внегалактическое фоновое излучение сложно обнаружить, поскольку оно доходит до нас, преодолевая огромные расстояния, и его затмевают находящиеся вблизи Земли яркие источники света.
- Сегодня появилась возможность измерить плотность этого излучения, определяя, как ослабевает поток гамма-лучей от удаленных ярких галактик (блазаров) в результате взаимодействия с фотонами внегалактического фонового излучения.
- Новый метод позволяет получить информацию об эволюции Вселенной.



Альберто Домингес и Джоэл Примак) смогли «увидеть» внегалактическое фоновое излучение, опираясь на данные, полученные с помощью Космического гамма-телескопа «Ферми» и наземных детекторов гамма-излучения очень высокой энергии, так называемой системы атмосферных гамма-телескопов с использованием эффекта Черенкова. Поскольку звезды дают наибольший вклад в ВФИ либо сами по себе, либо раскаляя межзвездную пыль, которая испускает свет больших длин волн, ВФИ представляет собой хранилище «памяти» об образовании звезд в разные эпохи на протяжении всей истории Вселенной. Отслеживая изменение ВФИ за несколько миллиардов лет, мы сможем проследить эволюцию галактик с древнейших времен до сегодня. Со временем это позволит нам изучить самое первое поколение галактик, существовавших 13 млрд лет назад, свет от которых слишком слаб, чтобы его можно было увидеть напрямую с помощью современных телескопов.

### Происхождение внегалактического фонового излучения

Парадокс Ольберса оставался по сути философским вопросом вплоть до 1960-х гг., когда благодаря выдающимся астрономическим открытиям, затрагивающим все области электромагнитного спектра, космология перешла от умозрительных построений к строгим наблюдениям. Обнаруживались все новые и новые галактики причудливой формы и межгалактические объекты. Становилось ясно, что Вселенная наполнена разреженным фотонным «газом». Составляющие его фотоны имели самые разные длины волн и, следовательно, обладали разной энергией (чем меньше длина волны, тем выше энергия, и наоборот). Этот газ включал фоновое и ряд других видов излучений, которые распространялись по всем направлениям. Самое интенсивное из них — космическое микроволновое фоновое (или реликтовое) излучение, отголосок Большого взрыва. Его открыли в 1965 г. молодые американские астрофизики Арно Пензиас (Arno Penzias) и Роберт Вудро Вильсон (Robert Woodrow Wilson), работавшие тогда в AT&T Bell Laboratories, за что получили в 1978 г. Нобелевскую премию по физике. В 1960-х гг. с помощью геофизических зондирующих ракет был



зарегистрирован другой вид излучения — диффузное внегалактическое рентгеновское гамма-излучение, а в конце 1960-х гг. орбитальная солнечная обсерватория обнаружила еще один тип фонового излучения — гамма-лучи очень высокой энергии.

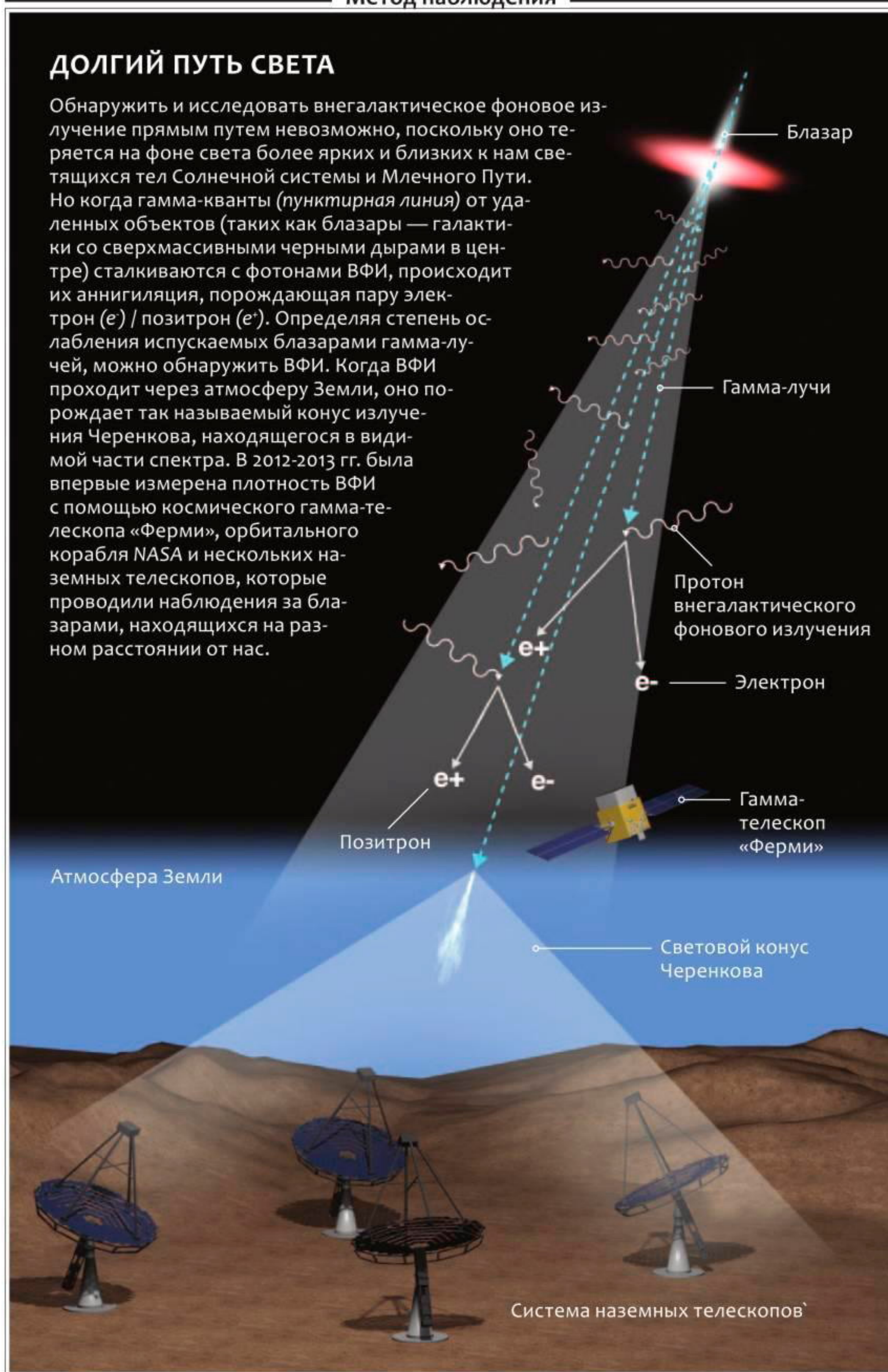
ВФИ включает ближний ультрафиолет, видимый свет и инфракрасное излучение; оно второе по энергии и интенсивности после реликтового. В отличие от последнего, оно возникло не одновременно, а нарастало в течение миллиардов лет, с момента образования первых звезд в первых галактиках спустя примерно 200 млн лет после Большого взрыва. ВФИ увеличивается и сегодня с рождением новых звезд.

Прямое измерение ВФИ посредством регистрации составляющих его фотонов с помощью телескопов сродни наблюдению за тусклой лентой Млечного Пути ночью среди ярко сияющих театральных афиш, рекламных щитов и небоскребов на площади Таймс-сквер в Нью-Йорке. У ВФИ много «конкурентов» в видимом и инфракрасном диапазонах. Земля находится в чрезвычайно яркой галактике, состоящей из миллиардов звезд и облаков светящегося газа, и этот свет затмевает внегалактическое фоновое излучение. Что еще



### ДОЛГИЙ ПУТЬ СВЕТА

Обнаружить и исследовать внегалактическое фоновое излучение прямым путем невозможно, поскольку оно теряется на фоне света более ярких и близких к нам светящихся тел Солнечной системы и Млечного Пути. Но когда гамма-кванты (пунктирная линия) от удаленных объектов (таких как блазары — галактики со сверхмассивными черными дырами в центре) сталкиваются с фотонами ВФИ, происходит их аннигиляция, порождающая пару электрон ( $e^-$ ) / позитрон ( $e^+$ ). Определяя степень ослабления испускаемых блазарами гамма-лучей, можно обнаружить ВФИ. Когда ВФИ проходит через атмосферу Земли, оно порождает так называемый конус излучения Черенкова, находящегося в видимой части спектра. В 2012-2013 гг. была впервые измерена плотность ВФИ с помощью космического гамма-телескопа «Ферми», орбитального корабля NASA и нескольких наземных телескопов, которые проводили наблюдения за блазарами, находящимися на разном расстоянии от нас.



гораздо более мощное свечение Солнечной системы и Млечного Пути? Вряд ли. По крайней мере наземные и космические телескопы не смогли этого сделать. В 2000 г. Пьеро Мадау (Piero Madau) из Калифорнийского университета в Санта-Крузе и Лючия Поццетти (Lucia Pozzetti), работающая в Астрономической обсерватории Болоньи, суммировали интенсивность света, идущего от галактик, обнаруженных с помощью Космического телескопа «Хаббл». (Напомним, что внегалактическое фоновое излучение — это весь свет, излучаемый в диапазоне от ближнего ультрафиолета до инфракрасной области, включая свет от самых ярких галактик, измерить который не составляет труда, плюс свет от таких тусклых галактик, что их невозможно увидеть в телескоп.) Но при таком способе нельзя вычленить свет тусклых галактик или другие возможные источники света, следовательно, он дает лишь нижний предел возможной яркости ВФИ при различных длинах волн.

В 2011 г. Домингес и Примак вместе с другими нашими коллегами установили более строгие нижние пределы для ВФИ, суммировав интенсивность инфракрасного и видимого света, зарегистрированного с помощью наземных и космических телескопов, который испусти-

хуже — Земля «обитает» в очень хорошо освещенной Солнечной системе: рассеяние солнечного света космической пылью в окрестностях ее орбиты порождает зодиакальный свет — иногда настолько яркий, что в темное время суток в определенное время года его по ошибке можно принять за утреннюю зарю. Длины волн этого рассеянного света находятся в том же диапазоне, что и у ВФИ.

Так можно ли надеяться, что когда-нибудь удастся напрямую идентифицировать низкоэнергетические ВФИ-фотоны, если их «забивает»

ли ближайшие галактики примерно 8 млрд лет назад, что соответствует немногим больше половины времени от настоящего момента до Большого взрыва. (Заглянуть в глубокий космос на огромные расстояния — это примерно то же, что заглянуть назад в бесконечность, поскольку мы видим космические объекты сейчас, когда свет от них достиг наших телескопов, такими, какими они были миллиарды лет назад.) Мы сравнили спектры излучения галактик, удаленных от нас на разное расстояние — т.е. относящихся к разным космическим



эпохам. Это наилучший на сегодня способ определения яркости ВФИ, основанный на наблюдениях. Мы оценили верхнюю и нижнюю границы ВФИ даже для более удаленных и старых галактик, у которых параметр красного смещения больше 1.

Но чтобы оказаться внутри этого предела — т.е. реально измерить яркость внегалактического фонового излучения, — нужны другие подходы.

### Сталкивающиеся фотоны

В 1960-х гг. у астрофизиков возникла идея «проникнуть внутрь» ВФИ через его взаимодействия с другими, более легко поддающимся наблюдениям излучениями.

Известно, что фотоны иногда сталкиваются друг с другом, в частности высокоэнергетические гамма-кванты могут сталкиваться с низкоэнергетическими фотонами, например квантами света, испускаемого звездами. В момент столкновения фотоны исчезают, а на их месте появляются электрон и его античастица, позитрон. Возникает вопрос: что произойдет, если гамма-лучи высокой энергии, идущие из далекого космоса, встретятся на пути к Земле с низкоэнергетическими фотонами ВФИ? Будут ли последние ослаблять видимую с Земли яркость гамма-излучения их источника? Если ослабление обнаружится, можно будет установить структуру ВФИ.

Этот вопрос оставался открытым до 1992 г., когда установленный на борту орбитальной гамма-обсерватории «Комптон» (*Compton Gamma Ray Observatory*) гамма-телескоп *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)* впервые зарегистрировал новый тип источников гамма-лучей — блазары, галактики со сверхмассивными черными дырами в центре, испускающими мощные струи гамма-частиц. Некоторые блазары, например *Markarian 421 (Mrk 421)*, испускают гамма-лучи колоссальной — 20 трлн эВ — энергии, что примерно в 100 млн раз больше энергии рентгеновских лучей, применяемых в медицине.

*Markarian 421* находится от нас на расстоянии примерно 400 млн световых лет, т.е. относительно близко в межгалактическом масштабе. Обнаружив в 1990-х гг. такой мощный источник гамма-лучей, Примак подумал: может быть, аналогичные блазары есть и на значительно большем удалении от Земли, что помогло бы в изучении ВФИ? Впоследствии такие очень далекие «теравольтные» блазары действительно были обнаружены. Как использовать этот факт, Домингес понял в 2006 г., во время работы над кандидатской диссертацией

в Севильском университете в Испании, где он изучал блазары с помощью системы телескопов Черенкова (*MAGIC*).

В 2012 г. Домингес стал членом коллектива из 150 астрофизиков, возглавляемых Марко Аджелло (*Marco Ajello*), который первым измерил количество света блазара, поглощаемого ВФИ. Исследователи тщательно изучили данные, полученные с помощью запущенного NASA Космического гамма-телескопа «Ферми», проанализировали результаты наблюдений за 150 блазарами, находящимися на разном удалении от Земли, чтобы определить, как сильно ослабляются гамма-лучи по мере прохождения сквозь «толщу» ВФИ. Наблюдения расширились до параметра красного смещения 1,6, что соответствует свету, излученному почти 10 млрд лет назад.

## Обнаружение внегалактического фонового излучения было одной из самых сложных задач в наблюдательной астрономии — регистрация такого слабого рассеянного света потребовала координированной работы нескольких телескопов и целых научных коллективов по всему миру

Чтобы продвинуться дальше, нужно было разобратся в природе блазаров и таким образом выяснить, какое количество гамма-лучей разной энергии блазар испустил до того, как некоторые из этих лучей были поглощены в результате соударения с протонами ВФИ по всему внегалактическому пространству в миллиарды световых лет.

Оптимальным подходом к оценке исходной плотности излучения блазаров представляется объединение теоретических моделей их «деятельности» — прежде всего способа генерирования высокоэнергетического гамма-излучения — с результатами телескопических наблюдений испускаемых ими низкоэнергетических гамма- и рентгеновских лучей, которые были поглощены ВФИ. По-видимому, высокоэнергетическое гамма-излучение многих блазаров порождается в ходе так называемого синхротронного обратного комптоновского (*Synchrotron-Self-Compton, SSC*) рассеяния. Электроны и позитроны струй блазара, взаимодействуя с магнитными полями, испускают рентгеновские лучи. Часть их соударяется с электронами такой же энергии, порождая гамма-лучи.



SSC-модели позволяют предсказать исходную интенсивность высокоэнергетического гамма-излучения, сопоставляя ее с интенсивностью низкоэнергетического гамма-излучения, которую мы можем измерить.

В 2013 г. Домингес, Примак, Джастин Финк (Justin Finke) из Научно-исследовательской лаборатории ВМФ США, Франциско Прада (Francisco Prada) из Института астрофизики Андалусии и трое других ученых сопоставили результаты проведенных практически одновременно наблюдений за 15 блазарами, находящимися на разных космологических расстояниях. Для этого были задействованы шесть космических кораблей NASA и несколько наземных телескопов, работающих в разных диапазонах длин волн. Мы сравнили данные, полученные с помощью гамма-телескопа «Ферми», с интенсивностью рентге-

## Окно в прошлое

Обнаружение внегалактического фонового излучения было одной из самых сложных задач в наблюдательной астрономии: регистрация такого слабого рассеянного света потребовала координированной работы нескольких телескопов и целых научных коллективов по всему миру. Зато теперь мы имеем новый мощный инструмент для изучения истории космоса. Как только стало ясно, что блазары — весьма ценный объект с точки зрения исследований ВФИ, а произошло это в 1990-х гг., Примак и Донн Макминн (Donn MacMinn), в то время подающий большие надежды дипломник колледжа Калифорнийского университета в Санта-Крузе, задались вопросом: нельзя ли извлечь из получаемых результатов информацию об эволюции галактик? У нас до сих пор остаются без ответа множество фундаментальных вопросов отно-

сительно их образования. Так, мы не знаем, что представляют собой многочисленные массивные звезды на разных стадиях формирования, каким образом космическая пыль поглощала свет звезд и переизлучала его при больших длинах волн, как изменяются звезды, образовавшиеся в галактиках, по ходу эволюции Вселенной. Макминн и Примак поставили перед собой цель исследовать гамма-излучение блазаров, находящихся от нас на разном расстоянии, т.е. излучение, прошедшее сквозь разную толщину ВФИ, чтобы попытаться ответить на некоторые из этих основопо-

лагающих вопросов и приоткрыть завесу над тайной формирования звезд в разные эпохи.

Так, известно, что удаленные галактики ранней Вселенной визуально существенно отличаются от близлежащих галактик: это не правильные сфероиды или изумительные по красоте спирали, а компактные образования нерегулярной формы. Последнее отчасти объясняется столкновениями между ранними галактиками, поскольку юная Вселенная была намного плотнее сегодняшней. Кроме того, ранние галактики излучают гораздо больше света в инфракрасном диапазоне, чем близлежащие. Это значит, что спектр ВФИ, исходящего от далеких старых галактик, отличается от такового ВФИ, порождаемого более молодыми галактиками, которые находятся ближе к нам.

Таким образом, особенности поглощения гамма-лучей ВФИ-фотонами из глубокого космоса — т.е. в далеком прошлом — тоже должны отличаться от таковых для ближнего космоса. Действительно,

**Ночное небо только кажется темным.  
На самом деле оно наполнено светом  
всех когда-либо существовавших  
галактик. Это фоновое излучение,  
пронизывающее каждый  
кубический сантиметр космического  
пространства, постоянно  
пополняется светом от вспышек  
сверхновых, ярким свечением  
облаков газа, светом новых звезд**

новых лучей, испускаемых теми же блазарами, измеренной спутниками космической рентгеновской обсерваторией «Чандра», орбитальной обсерваторией «Свифт», космическими рентгеновскими телескопами «Росси» и «Ньютон», а также наземными обсерваториями в оптическом и радиодиапазонах.

Сопоставляя эти наблюдения, сделанные на различных длинах волн, с предсказаниями SSC-моделей, мы смогли оценить неослабленную яркость гамма-лучей, испускаемых девятью самыми мощными блазарами, чья энергия излучения измеряется теравольтами. Сравнив эти данные с результатами прямых измерений, сделанных наземными телескопами, ослабленного гамма-излучения тех же самых блазаров, которое доходит до Земли, мы определили плотность ВФИ по его «отпечатку», оставленному в спектре излучения блазаров с разным параметром красного смещения, т.е. находящихся на разном удалении от Земли.



к 1994 г. Макминн и Прима, основываясь на многочисленных модельных построениях, пришли к выводу, что главный фактор, определяющий характеристики ВФИ, это время формирования галактики — источника фотонов. Введя ряд космологических допущений, мы спрогнозировали, как будет расти во времени затухание потока фотонов под действием ВФИ, и в конце концов продемонстрировали, что, опираясь на данные о поглощении ВФИ гамма-квантов, исходящих от теравольтовых источников, которые находятся от нас на разном расстоянии, можно сравнивать альтернативные теории эволюции галактик.

Теперь, когда у нас есть первые характеристики ВФИ, основанные на данных об ослаблении излучения блазаров, можно попытаться получить картину формирования звезд и галактик за все время существования Вселенной. Например, полученный нами спектр ВФИ дает представление о том, что происходило на пике формирования звезд — в «космический полдень» — в период между 8 и 12 млрд лет назад. В спектре четко видны два всплеска: один связан с ультрафиолетовым и оптическим излучением звезд, другой, более сильный — с излучением в дальнем инфракрасном диапазоне, вероятно, связанным с космической пылью. Известно, что вспыхивающие звезды порождают пыль, состоящую из таких элементов, как углерод, водород и железо, которая окутывает области формирования звезд; в «космический полдень» эта пыль поглотила большую часть света звезд и переизлучила его в инфракрасном диапазоне. ВФИ позволяет узнать, насколько обычными в то время были такие «запыленные» галактики, а это, в свою очередь, дает ключ к пониманию процесса образования твердых планет (в том числе Земли), поскольку такие планеты содержат большое количество космической пыли.

### Взгляд в будущее

Трудно передать словами, что испытывает человек, когда его давняя мечта воплощается в жизнь. Мы оказались такими счастливыми: наблюдения за внегалактическим фоновым излучением с применением множества разнообразных телескопов подтвердили наши предположения. И какое же удовольствие — анализировать теперь эту информацию, полученную с помощью совершенно нового космологического инструмента, прослеживая связь эволюции ВФИ и всей Вселенной.

Дальнейшие исследования могут поведать нам, что происходило во Вселенной в еще более ранние периоды. Если нам удастся включить в наблюдения несколько источников гамма-излучения с еще большим параметром красного смещения, мы сможем проникнуть в тайну реионизации Вселенной (когда ультрафиолетовое излучение от самых первых звезд выбивало электроны из атомов водорода)

в первый миллиард лет после Большого взрыва. Эту цель преследует масштабный международный проект *Cherenkov Telescope Array*, который сейчас находится на стадии разработки и предполагает возведение в Северном и Южном полушариях массивов телескопов, предназначенных для регистрации гамма-лучей в широком диапазоне энергий. И когда мы получим окончательные количественные оценки ВФИ, у нас появится возможность объяснить природу блазаров, этих экзотических объектов Вселенной.

Интересно, что плотность ВФИ, измеренная косвенным путем с помощью нашего метода оценки ослабления гамма-лучей, согласуется с величиной, оцененной независимо по данным для наблюдаемых галактик более ранних космических эпох. Это свидетельствует об адекватности метода изучения ВФИ с помощью ослабления гамма-лучей, что приближает нас к истине.

С совершенствованием наблюдательных методов совпадение между результатами разных способов измерений будет либо становится еще более полным, тем самым значительно уменьшая вероятность существования альтернативных источников света во Вселенной (таких, например, как распадающиеся гипотетические реликтовые частицы в юной Вселенной), либо, напротив, ухудшаться. И тогда придется предположить, что существуют какие-то неизвестные нам астрофизические явления (например, превращение экзотических гипотетических частиц в гамма-лучи). Установить истину помогут такие проекты, как строящаяся сейчас обсерватория *Cherenkov Telescope Array*, орбитальный космический телескоп «Джеймс Уэбб», наземный широкоугольный телескоп-рефлектор *Large Synoptic Survey Telescope (LSST)* и система тридцатиметровых наземных телескопов.

Итак, объяснение парадоксу Ольберса найдено: ночное небо только кажется темным. На самом деле оно наполнено светом всех когда-либо существовавших галактик, просто этот свет трудно обнаружить. Это фоновое излучение, пронизывающее каждый кубический сантиметр космического пространства, постоянно пополняется светом от вспышек сверхновых, ярким свечением облаков газа, сиянием новых звезд. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Detection of the Cosmic  $\gamma$ -ray Horizon from Multiwavelength Observations of Blazars. A. Domínguez et al. in *Astrophysical Journal*, Vol. 770, No. 1, Article No. 77;
- Анимационный видеоролик о блазарах см. по адресу: [ScientificAmerican.com/jun2015/ebi](http://ScientificAmerican.com/jun2015/ebi)