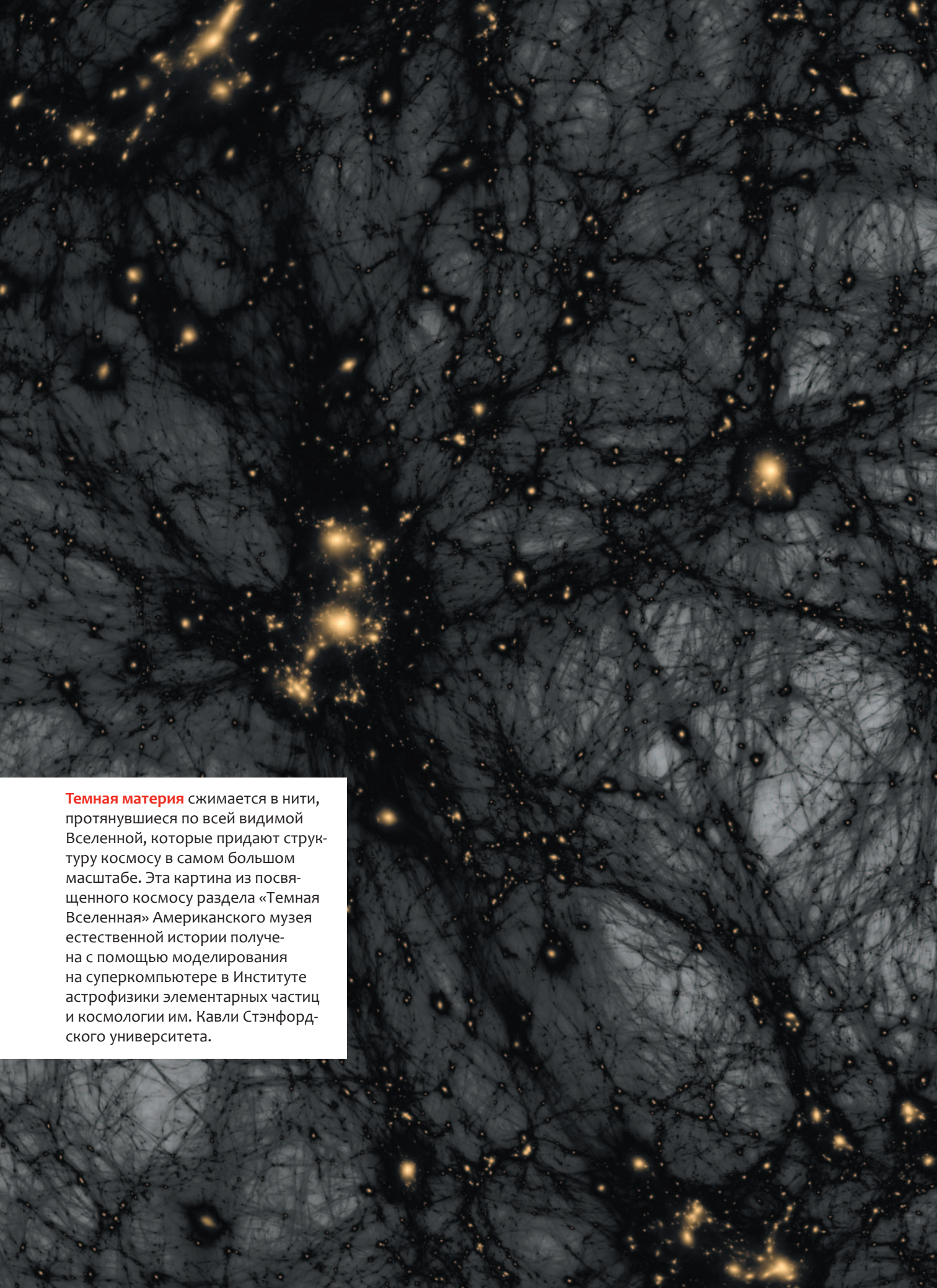


The image is a full-page background illustration of the cosmic web. It features a complex, interconnected network of dark, thread-like structures (filaments) that form a web across the entire frame. Scattered throughout this web are numerous bright, yellowish-white points of light, which represent galaxies and galaxy clusters. The density of these points is higher along the filaments and at their intersections, creating a sense of depth and structure. The overall color palette is dark, with the black and grey of the filaments contrasting sharply with the bright, glowing points of light.

Темная материя сжимается в нити, протянувшиеся по всей видимой Вселенной, которые придают структуру космосу в самом большом масштабе. Эта картина из посвященного космосу раздела «Темная Вселенная» Американского музея естественной истории получена с помощью моделирования на суперкомпьютере в Институте астрофизики элементарных частиц и космологии им. Кавли Стэнфордского университета.

A detailed visualization of the cosmic web, showing a dense network of dark matter filaments and nodes. Numerous small, bright yellow and orange spots representing galaxies are scattered throughout the structure, particularly concentrated at the intersections and along the filaments. The background is a deep, dark grey/black.

Ноам Либескинд

Карликовые галактики и темная паутина

Небольшие галактики, обращающиеся вокруг Млечного Пути,
возможно, прибыли по гигантским магистралям из темной
материи, насквозь пронизывающим Вселенную

ОБ АВТОРЕ

Ноам Либескинд (Noam I. Libeskind) — астрофизик, разработавший математическую модель Вселенной в Астрофизическом институте в Потсдаме, Германия.



«Вздор! Чушь!

Галиматья!»

— выпалил Павел Крупа, астрофизик Боннского университета, когда я стоял на кафедре в лекционном зале. Тогда я еще только оканчивал аспирантуру и подал документы на замещение должности научного сотрудника. Я приехал в Бонн, чтобы прочесть сорокапятиминутный доклад о своих исследованиях небольших галактик — спутников Млечного Пути. Я помог разработать теорию, которая объясняла, почему эти загадочные объекты расположены словно на прочерченной по небу прямой, — неожиданная и крайне загадочная конфигурация. Крупу, по-видимому, мои доводы не убедили.

Большинство галактик, как и наш Млечный Путь, окружены десятками небольших спутников, которые обращаются по орбитам вокруг них. Эти спутники крайне тусклы — из них лишь самые яркие и близкие были замечены в окрестности нашей Галактики и ближайшего соседа, галактики Андромеда. Но эти карликовые галактики-спутники летают не хаотично: все они расположены примерно в одной плоскости, кажущейся нам прямой линией.

Компланарность кажется неожиданной. Компьютерные модели эволюции галактик показывали, что в каждом направлении небесной сферы должно располагаться примерно одинаковое число галактик-спутников. Долгое время считалось, что такое сферически симметричное распределение — естественное следствие существования темной материи, загадочной субстанции, которая взаимодействует с обычной материей лишь посредством гравитации. Астрономы полагают, что темная материя преобладает во Вселенной и играет ключевую роль в формировании галактик и расширении пространства.

Однако загадка компланарности карликовых галактик не давала покоя и привела некоторых астрономов, включая Крупу, к вопросу, существует ли темная материя вообще. «Гипотеза о темной материи показала свою несостоятельность, — заявил он, прерывая мой доклад, — поскольку сделанные на ее основе предсказания о том, что спутники должны быть распределены сферически симметрично вокруг Млечного Пути, находятся в прямом противоречии с тем, что мы наблюдаем».

Я представлял другой взгляд на проблему, который пытается объяснить странное расположение галактических спутников наличием космических структур темной материи, больших, чем наш Млечный Путь. Хотя небольшое число скептиков вроде Круппы остаются при своем мнении, недавние работы, включая мою, показывают, как гигантская паутина темной материи способна объяснить уникальное расположение галактик-спутников на небосводе.

Недостающая материя

Гипотеза о темной материи, лежащая в центре этой полемики, впервые была высказана для объяснения других загадочных свойств галактик. В 1930-е гг. великий астроном Фриц Цвикки захотел «взвесить» скопление Волосы Вероники, гигантскую группу почти из тысячи галактик. Начал он с измерения скоростей, с которыми движутся галактики в этом скоплении. К своему удивлению, он обнаружил огромные скорости — тысячи километров в секунду, — достаточно большие, чтобы скопление разорвалось на части. Почему же оно не разлетелось на куски? Цвикки предположил, что скопление заполнено неким невидимым веществом, которое удерживает галактики вместе силой своей гравитации. Эту недостающую субстанцию впоследствии назвали темной материей.

! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Теории формирования галактик утверждают, что наш Млечный Путь должен быть окружен сферическим гало из небольших галактик-спутников. Однако поиски этих спутников оказались тщетными, и это заставило некоторых ученых поставить под сомнение фундаментальные принципы космологии.
- Спутники, которые удалось обнаружить, как правило, расположены в одной плоскости, пересекающей Млечный Путь.
- Полученные недавно результаты компьютерного моделирования объясняют малое число галактик и их концентрацию в одной плоскости существованием огромной паутины темной материи.

С тех пор, как 80 лет назад Цвикки впервые высказал свое предположение, призрак темной материи возникает то тут, то там по всей Вселенной, почти в каждой изученной галактике. В нашей собственной — Млечном Пути — астрономы выявили ее существование исходя из характера движения звезд на задворках галактики. Так же как и галактики в скоплении Волосы Вероники, эти звезды движутся слишком быстро, чтобы их могло удерживать все видимое вещество. А дюжина карликовых галактик вблизи Млечного Пути, по-видимому, богаче темной материей.

Вездесущность темной материи укрепила уверенность в ее существовании. И действительно, большинство космологов полагают, что темная материя составляет примерно 84% всей материи, перевешивая нормальные атомы в отношении примерно пять к одному.

Такое обилие темной материи предполагает, что она, по-видимому, играет исключительную роль в эволюции Вселенной. Один из путей изучения этой эволюции — использование компьютерных моделей. Начиная с 1970-х гг. ученые в области вычислительной космологии предпринимали попытки моделировать историю Вселенной с помощью компьютерных программ. Методика проста: задайте воображаемый прямоугольный объем; поместите туда в узлах почти совершенной решетки воображаемые точечные частицы, которые в этой модели имитируют сгустки темной материи;

рассчитайте гравитационное притяжение каждой частицы со стороны всех остальных и позвольте им двигаться в соответствии с действующим на них гравитационным полем; проследите этот процесс на интервале в 13 млрд лет.

С 1970-х гг. стратегии такого рода значительно развились и стали гораздо более сложными, но в основе своей этот метод используется по сей день. Сорок лет назад программа могла работать лишь с несколькими сотнями частиц. Современные методы компьютерного моделирования позволяют рассчитывать поведение миллиардов частиц в объеме, приближающемся к размеру наблюдаемой Вселенной.

Компьютерное моделирование Вселенной оказалось невероятно удобным способом исследовать отдельные галактики, но при этом оно породило и ряд непростых загадок. Например, компьютерные модели указывают, что темная материя, заполняющая гало вокруг Млечного Пути, стягивает газ и пыль в отдельные сгустки. Эти сгустки должны сжиматься под действием гравитации, образуя звезды и карликовые галактики. Вокруг Млечного Пути, окруженного темной материей, должны быть тысячи малых галактик. Однако, наблюдая ночное небо, мы видим их всего лишь несколько десятков. Неудача всех попыток их обнаружить стала очевидной в 1990-е гг., и с тех пор это называют «проблемой недостающих спутников».

Галактическая география

СТРАННЫЙ СЛОЙ ГАЛАКТИК

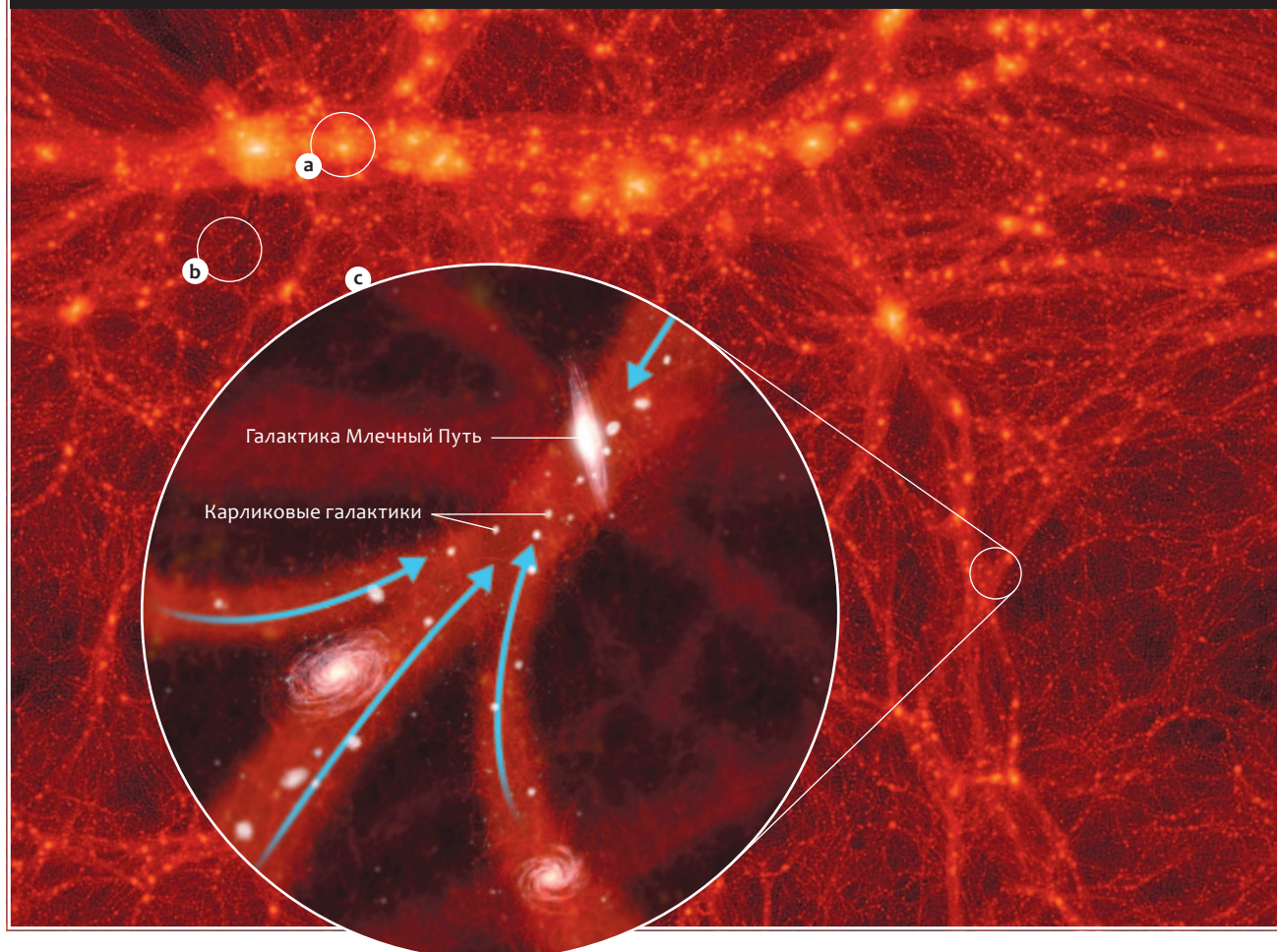
Моделирование Млечного Пути предсказывает, что десятки малых галактик-спутников должны наблюдаться в любом направлении. Но когда астрономы исследуют ночное небо, они обнаруживают, что галактики-спутники лежат в одной плоскости, которая почти перпендикулярна галактическому диску, содержащему спиральные рукава. И спутники соседней крупной галактики Андромеды тоже лежат в одной плоскости. Почему спутники выстроились так странно? Компьютерное моделирование указывает, что важную роль в этом могут играть гигантские структуры темной материи.



КОСМИЧЕСКИЕ МАГИСТРАЛИ ИЗ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Примерно через 14 млрд лет после Большого взрыва темная материя, преобладающая в нашей Вселенной, сгруппировалась в то, что космологи называют «космической паутиной», — в гигантскую сеть из нитей и узлов. Темная материя притягивает находящиеся поблизости газ и пыль, формируя в узлах, где плотность наивысшая, массивные галактики типа нашей **a**. В нитях плотность темной материи ниже, там

образуются карликовые галактики **b**. Со временем сильное гравитационное притяжение со стороны узлов стремится привлечь к себе вещество, расположенное в нитях, тем самым притягивая карликовые галактики к более крупным **c**. Из области внутри нашей галактики, откуда мы ведем наблюдения, карликовые галактики кажутся лежащими в плоскости, перпендикулярной галактическому диску.



За прошедшие годы астрономы придумали несколько возможных объяснений этой дилеммы. Первая и самая убедительная состоит в том, что не все спутники, появляющиеся в компьютерных моделях, строго соответствуют реально существующим галактикам-спутникам. Массы самых малых сгустков темной материи (и их гравитационное притяжение), возможно, недостаточны, чтобы захватить газ и сформировать звезды. Продолжая эту линию рассуждений, можно предположить, что наблюдаемые галактики-спутники — лишь видимая вершина темного айсберга: возможно, сотни, если не тысячи, темных галактик-спутников, не имеющих звезд, существуют вблизи. Просто мы их не видим.

Второе: даже если в небольших скоплениях темной материи сформировались звезды, возможно, они слишком тусклые, чтобы мы могли увидеть их в наши телескопы.

Тогда по мере развития техники и роста чувствительности телескопов астрономы обнаружат новые галактики-спутники. Действительно, за прошедшие несколько лет число известных галактик-спутников, обращающихся вокруг Млечного Пути, удвоилось.

Кроме того, сам диск нашей галактики, вероятно, мешает нам заметить некоторые спутники. Этот диск, по сути, — плотное плоское скопище звезд, настолько яркое, что для невооруженного глаза выглядит полосой белой жидкости (отсюда и название «Млечный Путь»). Очень трудно обнаружить спутники, прячущиеся за диском, столь же трудно, как днем увидеть Луну, — тусклый свет галактики-спутника тонет в сиянии Млечного Пути.

Все эти аргументы вместе взятые решают проблему недостающих галактик-спутников и убеждают

большинство астрофизиков. Они спасают идею темной материи, защищая ее от самых серьезных наблюдательных контраргументов. Однако странное пространственное расположение галактик-спутников по-прежнему ставит ученых в тупик.

Новая угроза карлика

В нескольких статьях, опубликованных в конце 1970-х — начале 1980-х гг., Дональд Линден-Белл (Donald Lynden-Bell), астрофизик Кембриджского университета, отметил, что многие из галактик-спутников, обращающихся вокруг Млечного Пути, по всей видимости, расположены в одной плоскости. Как объяснить такую странную картину? В 2005 г. Крупа и его группа из Боннского университета убедили мир, что такое компланарное расположение не могло быть случайным. Они предположили, что спутники из темной материи были равномерно распределены вокруг Млечного Пути, как и предсказывало компьютерное моделирование, и что только один из сотни этих карликов был достаточно велик, чтобы в нем образовались звезды и он стал заметен в телескоп. С учетом этих абсолютно разумных допущений они задались вопросом: как часто мы можем ожидать, что обнаружим систему вроде Млечного Пути, вокруг которой светящиеся спутники оказались бы выстроенными в ряд? Ответ произвел взрыв в космологии: вероятность этого — менее одной миллионной.

Наблюдаемые галактики-спутники — это лишь вершина темного айсберга: возможно, вокруг нас сотни, если не тысячи темных спутников, просто мы их не видим

«Если бы формированием галактик управляла темная материя, — возражает Крупа, — то галактики-спутники никогда бы не выстроились вдоль плоскости». Описывая в статье свои результаты, Крупа предложил собственное решение. «Единственный выход из положения, — писал он, — предположить, что спутники Млечного Пути сформировались не в результате агрегации темной материи». Темной материи, утверждал он, не существует.

Будучи хорошим теоретиком, Крупа предложил альтернативу. Он полагает, что спутники — это осколки крупной галактики-прародительницы, которая когда-то в прошлом пролетела близ Млечного Пути. Так же как астероид, пролетая сквозь атмосферу Земли, раскалывается и оставляет за собой хвост из обломков, возможно, и спутники Млечного Пути возникли из вещества, оторванного у более крупного предка.

Когда мы вглядываемся во Вселенную, говорит Крупа, у некоторых сталкивающихся галактик мы видим длинные мосты звездного вещества, называемые

приливными рукавами. Часто приливные рукава содержат небольшие галактики-спутники, которые образовались в результате сжатия захваченного вещества. При подходящих условиях сам процесс отрыва приводит к тому, что захваченное вещество собирается в одной плоскости, подобно спутникам Млечного Пути.

Объяснение Крупы было элегантным, простым и, самое главное, небесспорным. Оно быстро попало под шквал атак. Например, звезды в галактиках-спутниках Млечного Пути движутся слишком быстро в случае одной лишь обычной материи. Должно быть, вместе их удерживает темная материя, так же как она удерживает все части Млечного Пути. (Действительно, наблюдения указывают, что карликовые спутники Млечного Пути — это галактики с самым большим во Вселенной содержанием темной материи.) А приливный сценарий образования карликовых галактик предполагает, что в них нет темной материи, оставляя открытым вопрос, что не дает им разлететься на части.

Во-вторых, так же как при столкновении один автомобиль повреждает другой, столкновения между дисковыми галактиками разрушают диски. Почти всегда конечный результат столкновения галактик — бесформенный сгусток звезд. Млечный Путь имеет четко выраженную структуру и довольно тонкий диск. Мы не наблюдаем никаких признаков того, что в недавнем прошлом он пострадал в результате какого-либо столкновения или слияния.

Темная паутина

Альтернативное решение загадки необычного выравнивания карликовых галактик требует взглянуть дальше в глубины космоса. В работах по численному моделированию, которые начались в 1970-е гг., не просто изучается эволюция отдельных галактик, в них моделируются гигантские объемы Вселенной. Когда мы делаем это в самых больших масштабах, то видим, что галактики распределены не хаотически. Наоборот, они стремятся объединиться в строго определенную нитевидную структуру, называемую космической паутиной. Мы отчетливо различаем предсказанную структуру, когда рассматриваем карты распределения в пространстве реальных галактик.

Эта космическая паутина состоит из величественных слоев, заполненных миллионами галактик и протянувшихся на сотни миллионов световых лет. Эти слои соединены сигарообразными нитями. В промежутках между нитями лежат пустоты, в которых галактик нет. Большие галактики, такие как наша, обычно располагаются в тех точках паутины, где пересекаются множество нитей.

Будучи аспирантом Даремского университета в Англии, я строил компьютерные модели этих плотных областей. Однажды я принес распечатку последних результатов в кабинет моего научного руководителя Карлоса Френка (Carlos Frenk). Модель, над которой я работал, прослеживала формирование Млечного Пути и его окрестностей на протяжении 13 млрд лет истории

Вселенной. Френк несколько секунд внимательно рассматривал компьютерный рисунок, а затем взмахнул листком и воскликнул: «Оставь все остальное! Галактики-спутники, которые ты изучаешь, все до одной лежат в той самой невероятной плоскости Крупы!» Наша модель не воспроизводила результаты сделанных ранее компьютерных моделей — равномерное распределение галактик-спутников в гало Млечного Пути. Вместо этого компьютер предсказывал формирование спутников в одной плоскости — очень близко к тому, что наблюдают астрономы. Мы почувствовали, что с нашей модели начнется разгадка тайны того, как карликовые спутники смогли так странно расположиться в пространстве.

«Почему бы тебе не проследить эволюцию спутников обратно во времени, чтобы посмотреть, откуда они взялись?» — предложил Френк. У нас был конечный результат; теперь пришло время исследовать промежуточные этапы эволюции.

Когда мы изучали ход моделирования в обратном направлении, то увидели, что карликовые галактики не возникли в областях, непосредственно примыкавших к Млечному Пути. Как правило, они группировались немного дальше, внутри нитей космической паутины. Нити — это области более высокой плотности, чем

Новая проверка

Некоторые ученые, такие как Крупа, сохраняют скептицизм. Компьютерные модели вроде бы воспроизводят наблюдаемую вокруг Млечного Пути картину с достаточной точностью, но общая теория должна описывать также и окрестности других крупных галактик.

Теории предстоит пройти новую проверку. В январе 2013 г. астрономы, составлявшие карту областей вокруг ближайшей к нам галактики — Андромеды, обнаружили даже еще более тонкий слой спутников: огромная плоскость, миллион световых лет в поперечнике и толщиной всего в 40 тыс. световых лет — геометрические пропорции как у обычного ноутбука. Этот слой, по-видимому, вращается именно так, как предсказывает приливный сценарий Крупы. С другой стороны, компьютерные модели, похожие на мою, пока не смогли воспроизвести расположение галактик, наблюдаемое вокруг Андромеды.

Однако у приливной теории Крупы остаются серьезные проблемы: она тоже не в ладах с наблюдениями. История показывает, что в тупиковых ситуациях вроде этой окончательное решение приходит только в ходе накопления новых данных. Как однажды заметил Альберт Эйнштейн: «Природа не считает своей задачей помогать нам открывать ее законы».

Перевод: А.П. Кузнецов

**Поскольку Млечный Путь
расположен в узле, где
пересекаются нити,
карликовые галактики
двигаются вдоль породивших
их нитей, ускоряясь в нашем
направлении. Иными словами,
нити служат космическими
магистралями из темной
материи**

космические пустоты. Вероятно, поэтому они притягивают находящиеся поблизости пыль и газ и собирают их в нарождающиеся галактики.

Когда эти галактики сформировались, гравитация тащила их в направлении ближайших наиболее массивных областей — в нашем случае, к Млечному Пути. Поскольку Млечный Путь расположен в узле, где пересекаются нити, карликовые галактики движутся вдоль породивших их нитей, ускоряясь в нашем направлении. Иными словами, нити служат космическими магистралями из темной материи. Когда мы пристально вглядываемся в небо и видим карликовые галактики, расположенные в одной плоскости и движущиеся в одном направлении, мы, по сути, смотрим на поток встречных галактик.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Блиц Л. Темная сторона Галактики // ВМН, № 12, 2011.
- The Distribution of Satellite Galaxies: The Great Pancake. Noam I. Libeskind et al. in Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 363, No. 1, pages 146–152; October 11, 2005. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0503400>
- The Preferred Direction of Infalling Satellite Galaxies in the Local Group. Noam I. Libeskind et al. in Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 411, No. 3, pages 1525–1535; March 1, 2011. <http://arxiv.org/abs/1010.1531>
- Dwarf Galaxy Planes: The Discovery of Symmetric Structures in the Local Group. Marcel S. Pawlowski, Pavel Kroupa and Helmut Jerjen in Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 435, No. 3, pages 1928–1957; November 1, 2013. <http://arxiv.org/abs/1307.6210>