

Кандидат
физико-математических наук
С.М.Комаров

Мы продолжаем серию публикаций «Вселенная: материя, пространство, время» об устройстве окружающего мира, начатую в июльском номере. Теперь речь пойдет ни много ни мало, а о том, как можно попытаться изобразить всю Вселенную на нескольких листах бумаги и что получится в результате такой попытки.

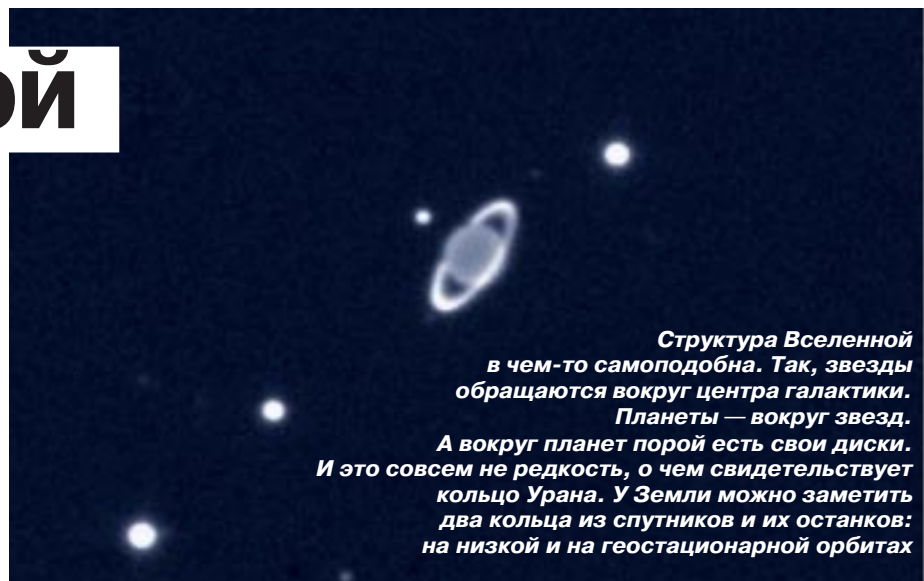
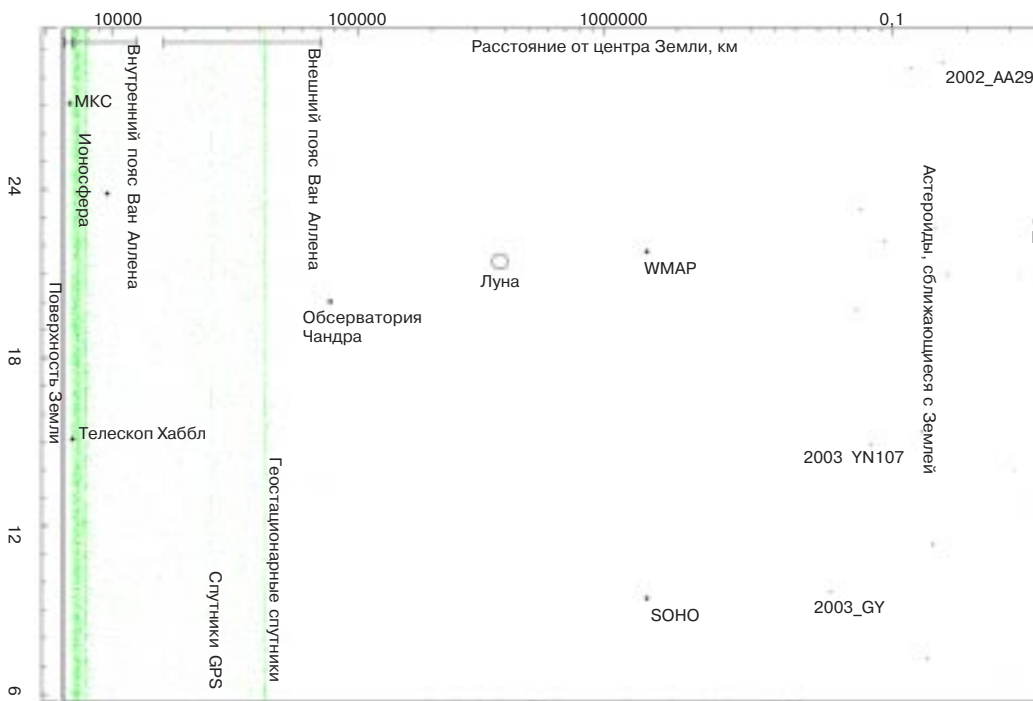
Карта Вселенной

Такая она, Вселенная, все дороги которой ведут в никуда.

Пол Андерсон

Измерения в разлетающемся мире

Нелегко построить карту мира, объекты которого находятся в постоянном движении — одновременно и перемещаются относительно друг друга, и разлетаются в разные стороны. «Не будем забывать, что на межзвездных расстояниях понятие одновременности далеко не очевидно», — писал в одном из своих рассказах про вольных торговцев Пол Андерсон, и это обстоятельство сильно осложняет жизнь исследователям космоса. Вот, например, как определить расстояние до какой-нибудь далекой звезды? До ближайшей не очень сложно: нужно посмотреть, как она смещается на звездном небе при наблюдении с разных точек орбиты Земли. Измерив смещение, или, как называют его астрономы, параллакс, несложно рассчитать расстояние до звезды. Только это будет расстояние, на котором звезда располагалась в тот момент, когда она испустила свет, а не когда его поймал телескоп. События же эти порой разделяют миллионы или миллиарды лет. Собственно, тот самый парсек, которым меряют межзвездные просторы астрофизики и писатели-фантасты, как раз обозначает расстояние, которое приводит к параллаксу в одну секунду дуги небесной сферы. (Астро-



**Структура Вселенной
в чем-то самоподобна. Так, звезды
обрачаются вокруг центра галактики.
Планеты — вокруг звезд.**

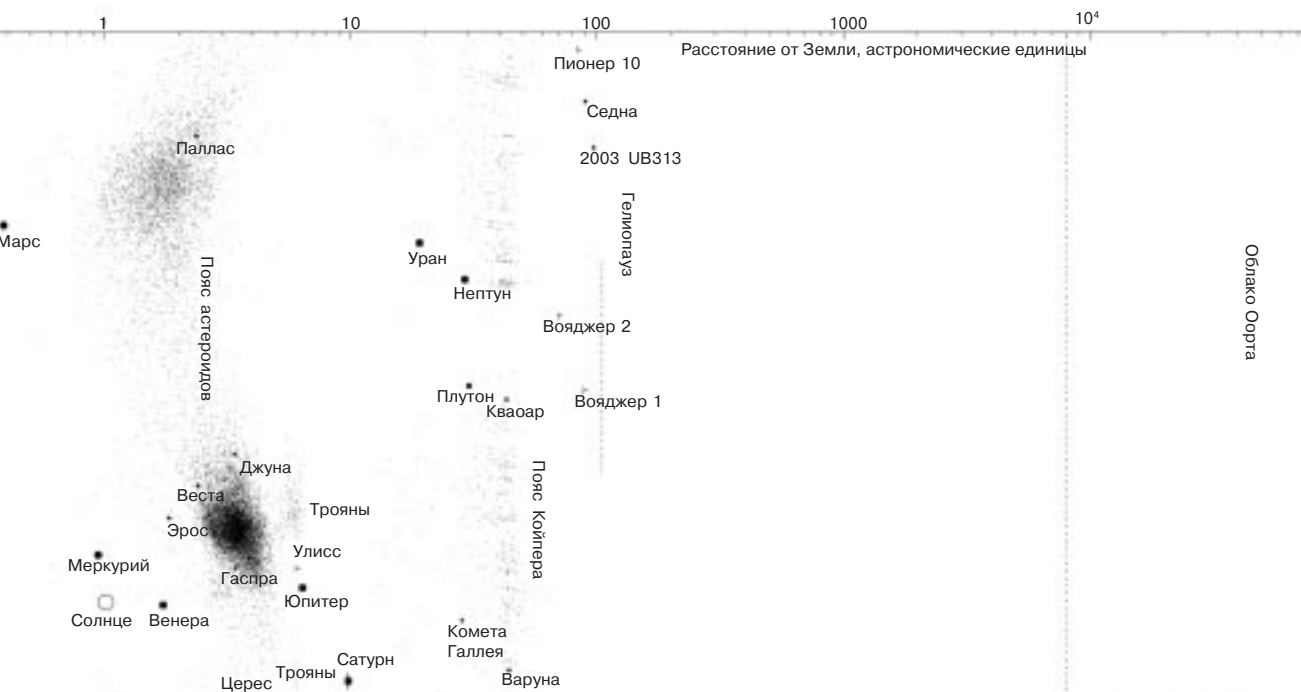
**А вокруг планет порой есть свои диски.
И это совсем не редкость, о чем свидетельствует
кольцо Урана. У Земли можно заметить
два кольца из спутников и их останков:
на низкой и на геостационарной орбитах**

номы пользуются сферической системой координат, в которой положение объекта задано радиусом сферы и двумя углами — долготой и широтой. Древнейший способ использования этих координат — задать положение объекта относительно звезд какого-то созвездия.) В астрономических единицах, то есть радиусах орбиты Земли, длина парсека превышает 206 тысяч а. е.; в СИ парсек обозначают пк. А расстояние до дальних звезд приходится высчитывать с помощью хитрых математических фокусов, причем заранее выбрав модель космологии. Изменится модель — и результат расчета может оказаться иным.

Большинство астрофизиков полагает, что мы живем в так называемой Фридмановской горячей Вселенной, которая расширяется из-за Большого взрыва, случившегося 13 с лишним миллиардов лет назад. Поведение такой Вселенной

описывают уравнения, предложенные советским физиком А.А.Фридманом в начале 20-х годов XX века, когда он исследовал возможность существования нестационарной Вселенной. Некоторое время физики воспринимали расчеты Фридмана как одну из забавных возможностей описать наш мир. И так было до тех пор, пока в 1929 году американский астроном Эдвин Хаббл не обнаружил странную закономерность: чем дальше от нас находится звезда, тем сильнее в красную сторону смещаются линии ее спектра излучения. Именно уравнения Фридмана для расширяющейся Вселенной давали отличное объяснение этого факта.

Дальше в историю космологии мы забираться не станем — этому будет посвящена отдельная статья цикла, а сейчас обратим внимание на знаменитые уравнения. Точнее, на использованную в них систему координат. Чтобы дать опи-



КАРТИНА МИРА: ФИЗИКА

сание странного, летящего и расширяющегося во все стороны мира, ученые придумали так называемые сопутствующие координаты. Хитрость в том, что в такой системе взаимное положение объектов не изменяется, а вот сама система координат расширяется. И это можно описать одним числом — параметром расширения, который зависит от того, сколько времени прошло с момента Большого взрыва.

Следующий математический фокус — связь между параметром расширения и красным смещением объекта. Оказывается, красное смещение какой-либо звезды связано простой формулой с двумя значениями параметра расширения: в тот момент, когда она испустила свет, и в тот момент, когда он долетел до глаза астронома, фотопластинки или ПЗС-матрицы телескопа. Значит, зная это смещение, можно рассчитать, сколь далеко мы заглянули одновременно в пространство и во время: чем больше красное смещение, тем более далекую от нас эпоху мы наблюдаем. Для этого пересчета и нужно задать космологическую модель и узнать параметры Вселенной, например плотность распределения материи, значение космологического члена, он же — плотность темной энергии, и прочие. Одни параметры поддаются измерениям, другие можно добыть только из теоретических расчетов. Вот так формула пересчета красного смещения в реальные координаты и оказывается связанной с теоретической моделью Вселенной.

Впрочем, все эти трудности не останавливают астрофизиков. Вот, например, в майском номере журнала «The Astrophysical Journal» за 2005 год группа американских ученых во главе с одним из пионеров вселенской картографии доктором Ричардом Готтом III из Принстонского университета опубликовала новую редакцию карты Вселенной, ко-

торая и послужила основой для этого рассказа. Ученые озабочены прежде всего тем, чтобы уменьшить искажения, возникающие при проецировании на плоскость разлетающегося трехмерного объекта, и по форме получившихся крупномасштабных структур Вселенной попытаться оценить справедливость той или иной космологической модели. Наша цель проще: показать, как выглядит Вселенная с учетом современного знания.

Масштаб

Изобразить на одном листе бумаги карту со столь большой разницей расстояний очень трудно. Однако в руках человеческих есть мощный инструмент — логарифмический масштаб: каждое новое деление на оси расстояний означает увеличение не на единицу, а на порядок, то есть в десять раз. В результате вдоль оси форма объектов искажается. Например, возникает иллюзия, что центр Млечного Пути сильно сдвинут в направлении от Земли. Но это всего лишь иллюзия, в чем можно убедиться, присмотревшись к значениям расстояний. Обосновывая такой выбор, авторы ссылаются на пример журнала «Нью-Йоркер», на обложке которого 29 мая 1976 года была опубликована картина Саула Стейнберга «Вид на мир с 9-й авеню». На переднем плане картины изображены в полный рост здания, которые стоят на этой улице. Далее расположена река Гудзон. На ее берегу в виде тонкого штриха показан Нью-Джерси. Скалистые горы выглядят небольшими холмами, а ширина Тихого океана не превышает ширины Гудзона. Именно такой геоцентрический вид — изображение все более крупных объектов во все уменьшающемся масштабе по мере удаления от нашей пла-

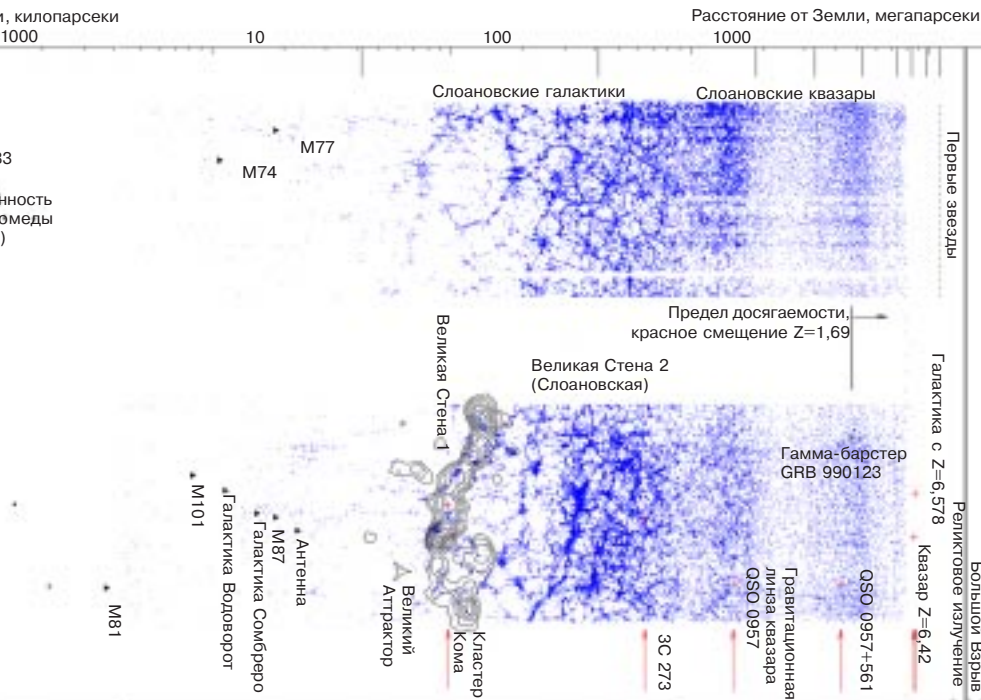
неты — и получается при использовании логарифмической шкалы.

На карте есть и вторая координата — это угол окружности экватора Земли. Его измеряют в часах: они показывают время на той или иной широте в тот момент, для которого построена карта. А третьей координаты нет: иметь дело с плоскими картами гораздо привычнее, чем с объемными. Авторы карты выбрали для проецирования на плоскость область в 2 градуса небесной сферы вверх и вниз от экватора Земли. Впрочем, иногда они отступают от этого правила, показывая некоторые важные объекты, что лежат вне пределов этого слоя. В качестве даты, которой соответствуют изображенные на карте объекты, выбрали ночь полнолуния 12 августа 2003 года, 4 часа 48 минут универсального времени.

Околосветное пространство

Итак, самый ближний к нам внесветной объект — это Международная космическая станция. Фактически она летит в верхних слоях атмосферы, в пределах ионосферы. Чуть повыше расположен космический телескоп Хаббл. Далее под защитой внутреннего радиационного пояса (пояса Ван Аллена), который возникает из-за взаимодействия заряженных частиц солнечного ветра с магнитным полем Земли, находятся многочисленные искусственные спутники и их обломки. Выше — спутники Глобальной системы навигации (GPS). Их количество велико: на карте появляется дзаметная линия.

Следующая линия — спутники связи и шпионские спутники на геостационарной орбите, то есть они вращаются с той же скоростью, что и Земля вокруг своей оси.



КАРТИНА МИРА: ФИЗИКА

кометы. Его радиус примерно в сто раз больше радиуса гелиопаузы. А дальше начинаются звезды.

Пространство Млечного Пути

«Тысячелетие за бесчисленными тысячами бежала эта звезда по своему пути, прежде чем оказалась между Бетельгейзе и Ригелем», — писал Пол Андерсон. Впрочем, подобную фразу можно встретить во множестве фантастических произведений, посвященных межзвездным путешествиям. Сириус и Бетельгейзе, Вега, Арктур и Прокцион, тау Кита и эпсилон Эридана — все они воспеты, и не раз, что не случайно: эти звезды расположены в ближайшей к нам окрестности нашей Галактики. Самая же близкая звезда — проксима Центавра. Она вместе с ярчайшей звездой земного неба альфой Центавра и еще одной звездочкой солнечного типа образует тройную звездную систему.

Тело Галактики, точнее, плоскость, в которой сосредоточена основная часть ее звезд, мы видим каждую ясную ночь в форме Млечного Пути. Так и называют нашу Галактику. Скопление пыли и газа в центральной части Млечного Пути мешает наблюдениям: на загалактической части карты Вселенной появляются два белых сектора.

Не прошло еще и десяти лет, как астрономы обнаружили планеты у некоторых звезд; их на карте обозначили кружочками. Первой была нейтронная звезда — пульсар PCR1257+12. Как оказалось позднее, у нее есть целых три планеты земного типа. Из числа звезд с планетными системами 95 принадлежат к тому же типу, что и Солнца. Самые известные из них — 51 Пегаса, 70 Девы и входящая в десятку ближайших звезд эпсилон Эридана. Планеты у них обнаружили по периодическим изменениям скорости вращения звезды. А вот планету размером с Юпитер у звезды OGLE-TR-56 астрономы впервые сумели разглядеть по изменению ее яркости.

Когда мы смотрим телевизор, то не задумываемся о том, что переносящие сигнал радиоволны свободно проходят сквозь ионосферу и потом блуждают по космосу. А что, если обитатели какого-то дальнего мира поймут эти волны и



дов расположены около Юпитера, в его точках Лагранжа. Эти астероиды называются Троянами.

Следующее скопление малых небесных тел — пояс Койпера в районе внешних планет. Именно там находится претендентка на звание десятой планеты нашей системы — Седна. Может показаться, что пояс Койпера состоит из чередования плотных и неплотных областей. Это тоже оптическая иллюзия: в одних направлениях поиск таких объектов был более пристальным, нежели в других.

Последняя область, мало-мальски связанная с Солнечной системой, — облако Оорта, то место, откуда к нам прилетают

Крабовидная туманность – остатки сверхновой, взрыв которой люди увидели в 1054 году

Колонны газа и пыли в туманности Орла сформированы потоками ультрафиолета от расположенного неподалеку кластера массивных молодых звезд. Через несколько миллионов лет эти колонны исчезнут

Стрелочками указан центр нашей Галактики



Сомбреро — спиральная галактика в профиль; NGC1232 — спиральная галактика анфас

сумеют их расшифровать? Что они увидят? Оказывается, визитной карточкой Земли будут лица спортсменов: первая телетрансляция достаточной мощности показывала открытие берлинской Олимпиады 1936 года. Другая сторона той же медали — лидеры Третьего рейха, которые присутствовали на трибунах. Этот радиосигнал уже прошел Вегу и Арктур.

Среди других интересных объектов Млечного Пути на карте обозначены такие, как Плеяды, остаток сверхновой в виде Крабовидной туманности, глобулярный кластер звезд М13 в созвездии Геракла, черная дыра X-1 в созвездии Лебедя, туманности Ориона и Орла. По мнению многих астрофизиков, в центре нашей Галактики расположена черная дыра массой в 2,6 миллиона солнечных масс. А за границей Галактики начинается мир галактических скоплений.

На межгалактических просторах

Удалившись на сотни килопарсеков от Земли, уже нет ни смысла, ни возможности разглядывать отдельные звезды — масштаб карты не позволяет. Поэтому речь пойдет о скоплениях галактик и структурах из них.

Млечный Путь — обычная спиральная галактика, и, как и прочие миллионы таких галактик, он входит в свое скопление. У нас есть две карликовые галактики-спутницы — Большое и Малое Магеллановы облака. Другие ближние галактики, общим числом 52, составляют Местную группу. Для полноты картины авторы поместили их всех на карту, даже если какие-то и не лежат в пределах рассматриваемого слоя в 4 градуса (их обозначили треугольниками). Самая изученная галактика — Туманность Андромеды, М31.

Галактика М81 — ближайшая из тех, что находится за пределами Местной группы, ее можно наблюдать невооруженным глазом в созвездии Большой Медведицы. Самое большое из расположенных неподалеку скоплений — это сверхкластер галактик в созвездии Девы. В его центре лежит галактика Дева А, М87, внутри которой, согласно расчету, должна быть черная дыра массой в три миллиарда солнечных масс. Неподалеку обретаются галактики интересных форм; их очень любят фотографировать астрономы: Водоворот, Сомбреро, Антенна. Этот сверхкластер не стоит на месте, но с заметной скоростью перемещается в направлении так называемого Великого Аттрактора (он расположен значительно выше рассматриваемой экваториальной плоскости, но для полноты также указан на карте).

А дальше находятся 126 тысяч галактик и 31 квазар, зафиксированные во время самого свежего, так называемого,



Слоановского цифрового обзора неба. Этот грандиозный проект начался в мае 1998 года в высокогорной обсерватории Апаче-Пойнт в штате Нью-Мексико (США). Во время обзора впервые без использования фотопластинок было получено изображение всех областей неба в пяти спектральных диапазонах, то есть зарегистрировано более 100 миллионов астрономических объектов. Их изображения передаются в память компьютера с ПЗС-матрицы автоматического 2,5-метрового телескопа. Астрономы же со всего мира придумывают способы и программное обеспечение, которые позволяют из всего массива информации добывать полезные данные.

Полученная при обработке результатов обзора часть карты дает возможность разглядеть крупномасштабные структуры Вселенной. Самые примечательные — это две Великие Стены, протяженные объекты из скоплений галактик, которые тянутся на сотни мегалпарсеков, или сотни миллионов световых лет.

Ближняя к нам структура протяженностью 216 Мпк была открыта во время предыдущего систематического обзора неба, в 1989 году. Для наглядности авторы карты изображали ее в виде линий плотности распределения вещества. В центре этой стены расположено самое большое скопление галактик — Кома, или скопление созвездия Волосы Вероники. Вторая

стена появилась после Слоановского обзора неба. Ее длина в два раза больше.

Интересная структура из двух вытянутых скоплений галактик видна в районе трех часов на расстоянии 200 Мпк; ее называют Пальцы Господни, которые словно указывают на Землю. На самом деле это очередная оптическая иллюзия. Причина в том, что галактики этих скоплений помимо участия в расширении Вселенной еще и довольно быстро движутся друг относительно друга и это движение вносит свой вклад в красное смещение. Результат — ошибка в расчете расстояния. А вот Великие Стены — не иллюзия. Они на самом деле существуют. Более того, похоже образование возникают во время компьютерных экспериментов, когда астрофизики моделируют образование Вселенной. Такое совпадение экспериментальных и теоретических данных говорит, что наши знания о Вселенной не так уж далеки от действительности.

На самом краю карты расположены два наиболее удаленных известных объекта: галактика SDF J132418.3+271455 (красное смещение 6,578) и квазар (красное смещение 6,42). За ними, на расстоянии немногим большем 10 Гпк от Земли, должна быть область, где находятся самые первые звезды Вселенной, но астрономы своими телескопами пока что не смогли пробиться сквозь столь огромную толщу пространства и внимательно рассмотреть, что же там есть. Откуда сейчас могут взяться первые звезды? Не надо забывать, что мы путешествуем не только в пространстве, но и во времени. Значит, объект, ныне расположенный на расстоянии в десяток гигапарсеков от Земли, испустил тот свет, который мы ловим сейчас, много миллиардов лет



Порой галактики собираются группами по четыре или по восемь штук в относительно малой области пространства. Рассматривая их, астрономы изучают особенности взаимодействия галактик. В верхнем правом углу — галактика M87



КАРИНА МИРА: ФИЗИКА

тому назад. А в то время звезды как раз и начали формироваться. Значит, если мы когда-нибудь увидим такой дальний свет, его источником будут первые звезды, больше, кажется, быть нечему.

Горизонт Вселенной

Пока мощности телескопов не хватает для того, чтобы заглянуть дальше нескольких гигапарсеков. Однако мы имеем представление о том, что там расположено: это граница той части Вселенной, которую можно наблюдать. Понять, где находится такой предел, можно следующим образом. Значение красного смещения для реликтового излучения — 1089, и это предельное значение. Реликтовое излучение, или, как его еще называют, микроволновой фон, возникло (в рамках модели горячей Вселенной) в ту пору, когда электроны, протоны и нейтроны остыли настолько, что сумели слип-

нуться в первые атомы. В результате вещество отделилось от излучения и Вселенная стала для последнего прозрачной. Красному смещению 1089 соответствует сфера радиусом 14 Гпк: в этой области пространства древний фотон в последний раз сталкивался с каким-либо веществом. Мы же вследствие расширения летим с такой скоростью, что он смог догнать Землю (которой в момент вылета фотона еще и в помине не было), лишь потратив 13 с лишним миллиардов лет. Это и есть граница видимой Вселенной; за ней лежит область еще более ранней Вселенной, где излучение просто не способно свободно распространяться. Она занимает 283 Мпк и ограничена сферой Большого взрыва. 14 Гпк гораздо больше, чем те 13,7 миллиарда световых лет, которые свет может путешествовать во Вселенной. Как же так? Разгадка проста: это то расстояние в сопутствующих координатах, на котором

от нас будет располагаться самая далекая испускающая свет частица, когда ее возраст станет таким же, как у нас сейчас.

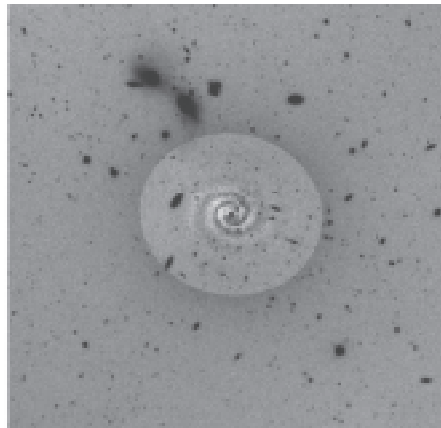
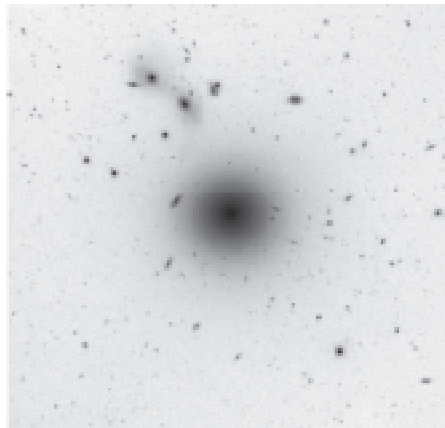
Есть еще один интересный парадокс. Казалось бы, если мы будем ждать бесконечно долго, то удастся поймать свет, который пришел от звезды, расположенной на бесконечно большом расстоянии. Ан нет, в расширяющейся Вселенной есть звезды, свет которых мы не увидим никогда: наш горизонт зрения ограничен радиусом 19 Гпк. С другой стороны, многие звезды убегают от нас так быстро, что сигнал, который мы пошлем сейчас, никогда не сможет их догнать. Эти звезды находятся за пределами сферы радиусом 4,74 Гпк или с красным смещением более 1,69. А их свет мы видим, потому что они его излучали очень давно, когда еще не улетели от нас слишком далеко.

Вот так выглядела наша Вселенная 12 августа 2003 года.

«Впервые я заинтересовался астрономией, когда мне было восемь лет, — говорит Ричард Готт. — Как же не похожи тогдашние карты на современную! На них не было ни искусственных спутников Земли, ни объектов пояса Койпера, ни звезд с планетными системами, ни коричневых карликов, ни черных дыр, ни внесолнечных источников рентгеновских лучей, ни гамма-барстеров, ни квазаров, ни великих аттракторов или гравитационных линз. Ни конечно же Великих Стен. Теперь все эти объекты нам известны». А сколько еще новых, невиданных ранее объектов предстоит открыть исследователям дальних миров, про это не знает никто.

На первый взгляд (слева) эта карликовая галактика (то есть содержащая миллионы, а не миллиарды звезд) кажется эллиптической.

Однако тщательная обработка изображения (справа) помогает выявить четкую спиральную структуру. Вот так астроному и приходится постоянно блуждать среди разного рода оптических иллюзий



По материалам статьи J. Richard Gott III, Mario Juri, David Schlegel, Fiona Hoyle, Michael Vogeley, Max Tegmark, Neta Bahcall, and Jon Brinkmann, «The Astrophysical Journal», 2005, т. 624, стр. 463 — 484, <http://www.astro.princeton.edu/~tjuric/universe/>

Карта опубликована с любезного разрешения авторов

Фотографии Южной европейской обсерватории, www.eso.org

