**Наш дом — Вселенная**

Б.И.Лучков, МИФИ, г. Москва

Вот дом, который построил Джек.

Англ. народная песенка. Пер. С.Маршака

Как точно написать свой адрес?

Сначало просто: квартира, дом, улица, город, страна. Потом, чуть подумав: планета Земля, звезда Солнце, галактика Млечный Путь. Далее (по мере укрупнения масштаба и фантазии): Местное скопление галактик, Сверхскопление в созвездии Дева, Вселенная (она же Метагалактика). Все. Только одно замечание: написав слово «Вселенная» с большой буквы, мы допустили существование множества других вселенных, составляющих что-то еще более крупное, чему пока нет названия. Однако мы никогда не сможем войти в контакт с ними ввиду конечной скорости распространения сигналов и ограниченного возраста нашей Вселенной. Включать их в адрес совершенно бесполезно.

Можно надеяться, что письмо с таким адресом дойдет по назначению, пройдя все указанные пункты.

**Видимая Вселенная**

Каждый, конечно, хорошо знает свой дом, улицу, город, страну. Наверное, Земля и Солнце тоже достаточно знакомы. А вот представления о Галактике (Млечном Пути), возможно, нуждаются в уточнении. Упомянутая впервые английским астрономом В.Гершелем, создававшим в XVIII в. самые большие в мире телескопы, Галактика представляет собой совокупность звезд, планетных систем, газа и пыли, удерживаемых вместе гравитационными силами. Млечный Путь – большая галактика (1012 звезд) с четырьмя спиральными рукавами, выходящими из центральной области, где находится ядро Галактики, объект не совсем понятной природы, возможно, очень массивная черная дыра. Большинство звезд сосредоточено в тонком диске (отношение радиус/толщина = 100 : 1), заметно утолщенном в центре, – молодая часть галактического населения, участвующая в общем вращении периодом 250 млн лет. Старая популяция – маломассивные звезды, шаровые звездные скопления – заполняет более обширную область – гало Галактики, по форме напоминающую сплюснутый эллипсоид с заметной концентрацией объектов к центру. На рис. 1 Галактика показана так, как она может быть видна с большого расстояния в телескоп другой разумной цивилизации.

Наше место в Галактике отнюдь не центральное (что надо признать большой удачей). Солнечная система находится приблизительно на половине расстояния от центра до края диска (точный радиус равен 8 кпк) и почти в середине диска по высоте. Удача, главным образом, в том, что здесь плотность звезд мала, их столкновения редки, а поля излучения (от радиоволн до жесткого рентгена) не очень опасны. Жизнь и возникает там, где ей меньше угроз: вряд ли приспособлена для обитания центральная часть Галактики, где много ярких переменных звезд и таких монстров, как нейтронные звезды и черные дыры. Солнце – небольшая, спокойная, достаточно щедрая на свет и тепло звезда, весьма удобная для жизни рядом с ней, в чем нам тоже сильно повезло.

Галактики часто под действием гравитационных сил образуют различные по форме скопления (кластеры галактик). Млечный Путь вместе с двадцатью галактиками, ближайшие из которых – его сателлиты (Большое и Малое Магеллановы Облака и ряд других карликовых галактик), образуют Местный кластер. Он, в свою очередь, входит в состав большого Сверхскопления, центром которого является активная галактика Дева-А и которое насчитывает более тысячи галактик, расположенных в радиусе 30 Мпк. Местный кластер находится где-то на краю Сверхскопления.

Более крупных единиц, чем сверхскопления, не обнаружено. Видимо, на этом иерархия структур заканчивается, так что Вселенная, на первый взгляд, состоит из скоплений и сверхскоплений галактик и пустого пространства между ними. Что-то вроде большого водоема, в котором взвешены и неспешно движутся «комки» вещества, разные по форме и размерам. Этот космический водоем, добавим, не так уж сильно богат веществом – расстояния между «комками» много больше их собственных размеров.

Такая картина, представшая в середине XX в., казалась естественной и вполне согласующейся с представлением о нашей Вселенной, появившейся приблизительно 15 млрд лет назад. Она однородна и изотропна, равномерно расширяется: расстояния между скоплениями растут, в ее большом масштабе действует только одна сила притяжения, заставляющая вещество скучиваться в «комки» – галактики и их скопления. Однако точные наблюдения показали, что скопления галактик распределены в пространстве далеко не равномерно.

**Ячеистая структура Вселенной**



Рис. 1. Вид галактики Млечный Путь сбоку: видны дисковая (молодая) и квазисферическая (старая) популяции звезд

Прогресс наблюдательных средств астрономии происходит непрерывно. Растут размеры телескопов (уже достигли 15 м в диаметре зеркала). Совершенствуются приемники света – теперь это не фотопластинки, а ПЗС-матрицы, обладающие большими чувствительностью и точностью изображения. Улучшается разрешающая способность спектрометров – главных поставщиков сведений об изучаемых объектах. Многочисленны достижения техники проведения наблюдений. Компьютерная революция произвела переворот в средствах сбора, обработки и хранения информации. К этому надо добавить, что центр интереса определенно сместился в область внегалактической астрономии, к изучению все более далеких миров.

Анализ огромного массива данных привел к представлению о том, что Вселенная заполнена не равномерной «смесью» скоплений галактик, а их «пеной», плотность которой в отдельных местах очень велика, а в других – практически нулевая. Другими словами, Вселенная состоит из отдельных ячеек размером 50–150 Мпк, в местах пересечения стенок которых (ребрах) галактики расселены очень плотно, а в центральных областях почти отсутствуют (эти ячейки называют войдами – от английского void – лишенный, пустой). Никакими статистическими флуктуациями ячеистая структура не может быть объяснена. Она – реальный факт, который отражает условия возникновения первичных неоднородностей вещества на ранней стадии Метагалактики. Таким образом, наблюдения отвергают старые модели и стимулируют поиски новых, в рамках которых ячеистая структура Вселенной была бы так же естественна, как шарообразная форма небесных тел в ньютоновской теории тяготения.

**Нестационарная космология**

Все попытки от Ньютона до Эйнштейна создать теорию стационарного мира, как известно, не дали результата. Мир упорно не хотел быть устойчивым и неизменным. Самые важные свидетельства этому, полученные из наблюдений, – разбегание галактик (определяемое по красному смещению линий в их спектрах) и тепловое реликтовое излучение температурой Т = 2,7 К, регистрируемое как изотропный радиофон. Взаимное разбегание галактик – прямой результат образования Вселенной в Большом Взрыве (Big Bang), в котором она возникла 15 млрд лет назад, как считают, из состояния с бесконечной плотностью. Реликтовое излучение – это остывшее в результате расширения тепловое поле Взрыва, температура которого в начальный момент была также бесконечной. Нестационарная космология, пионерами которой были русские физики Александр Фридман и Георгий Гамов, основывается на постулате об однородном и изотропном распределении вещества. В самом простом представлении Вселенная, возникнув из точечной сингулярности, во все эпохи представляла собой расширяющийся шар вещества, состав которого изменялся в соответствии с уменьшающейся температурой излучения, находящегося в термодинамическом равновесии с веществом.

А.Фридман первым нашел три возможных варианта нестационарной космологии. В первом (модель открытой Вселенной) расширение продолжается неограниченно долго, что вызвано превышением энергии разлета вещества над энергией его взаимного притяжения. Второй (модель плоской Вселенной) представляет тот редкий случай, когда указанные виды энергий в точности совпадают. Тогда разлет вещества будет также продолжаться, с тем только отличием, что его скорость, уменьшаясь, стремится к нулю. Третий (модель замкнутой Вселенной) дает кардинально новое решение: расширение остановится на некотором предельном радиусе, после чего энергия сил притяжения, превышающая энергию кинетического разлета, заставит вещество сжиматься (галактики начнут сближаться, будет наблюдаться синее смещение линий) вплоть до возвращения в исходную сингулярность.

Г.Гамов дополнил фридмановские модели учетом первичного нагрева вещества, которое во всех вариантах обладает определенной температурной зависимостью. Его модель назвали моделью Горячей Вселенной, получившей веское подтверждение открытием теплового реликтового фона. Излучение доминировало на начальных этапах жизни Вселенной, определяя ее состав. Высокая температура первых трех минут Большого Взрыва благоприятствовала протеканию термоядерных реакций синтеза, в ходе которых из первичной смеси протонов и нейтронов образовались ядра дейтерия (тяжелого водорода), гелия и, в малом количестве, лития. До более тяже

**Возникновение структуры**

Когда излучение доминирует, вещество представляет собой плазму, состоящую из протон-антипротонных пар в первые микросекунды, электрон-позитронных пар через секунду и из электронов и протонов (с примесью дейтронов и ядер гелия) в течение миллиона лет. Излучение, активно взаимодействующее с заряженными частицами, ведет себя как вязкая среда, в которой гасятся все движения частиц, в том числе вызванные взаимным притяжением. Структурных образований в плазме не возникает.

Но вот прошел миллион лет и излучение остыло до 4000 К, что ниже потенциала ионизации водорода. Ничто не мешает теперь протонам и электронам объединяться, образуя нейтральный газ (рекомбинация), к которому остывшее излучение «теряет всякий интерес», проходя сквозь него без заметного взаимодействия. Вот тут-то гравитация и напоминает о себе, заставляя газ сжиматься. Гравитационная неустойчивость вещества – следствие действия одной только силы притяжения – приводит к формированию всех видимых структур: от астероидов до сверхскоплений галактик.

С чего начинался этот процесс в первоначально однородном газе? Какие структуры возникли первыми? Как они развивались и во что перешли за миллиарды лет? Прямых ответов на эти вопросы теория пока не дает. В соответствии с рядом предложенных моделей рост первичных структур был обусловлен гравитационной неустойчивостью, при этом «центрами конденсации» вещества служили случайные уплотнения (флуктуации) среды. Раз возникнув, они продолжали расти за счет новых порций притягиваемого вещества, становясь большими газовыми облаками. При этом были возможны флуктуации двух типов: изотермические и адиабатические. Первые, затрагивающие только газ, должны были порождать облака умеренных размеров, сравнимые с наблюдаемыми сейчас шаровыми звездными скоплениями. Чтобы образовать структуры типа галактик, таким облакам надо укрупняться, соединяясь при столкновениях. Как это происходило, не очень понятно.

Второй тип флуктуаций мог происходить одновременно в газе и излучении и должен был приводить к появлению облаков гигантских размеров и массы. Сталкиваясь, они сжимали газ в тонких слоях контакта, образно называемых блинами, где и возникали условия для образования будущих структур. Модель блинов развивала группа академика Я.Б.Зельдовича в 70-х гг. Открытие ячеистой структуры Вселенной во многих чертах подтверждает эту модель: стенки ячеек – это места первичных блинов, ребра ячеек – их пересечения, а войды – межблинное пространство, где не было требуемых условий роста структур. Конечно, расмотренные модели весьма условны.

Скорее всего, природа использовала флуктуации обоих типов, создавая разномасштабные структуры. Но даже качественное совпадение теории и наблюдений вселяет уверенность в то, что ячеистая структура Вселенной – не только наблюдательный, но и вполне объяснимый познавательный факт.

**Проблема скрытой массы**

Эту и без того непростую картину Вселенной еще больше усложнили две «горячие» проблемы. Первая, называемая проблемой скрытой массы (или темной материи), занимает ученых уже более 30 лет. Суть ее состоит в том, что не все вещество во Вселенной заключено в звездах, галактиках и их скоплениях, т.е. в объектах светящихся и потому легко наблюдаемых. Гораздо бо1льшая масса (по разным оценкам, от 5 до 10 раз) оказывается невидимой. Вещество-неведимку не разглядеть в телескопы, оно не «засвечивает» себя в разных длинах волн, но достаточно надежно обнаруживается через гравитационное взаимодействие с окружающим обычным веществом, влияя на его движение. Наблюдения показали, что скрытая масса существует практически во всех подструктурах – галактиках, скоплениях и сверхскоплениях.

Кто скрывается за маской темной материи, до сих пор не известно. Она может быть как обычным веществом, но находящимся в объектах очень слабой светимости (маломассивные звезды в коронах галактик, нейтронные звезды, холодные газовые облака), так и совершенно новым видом материи, не участвующим ни в каких взаимодействиях, кроме гравитационного. Кандидатов современная физика подбрасывает достаточно много: массивные нейтрино, новые частицы и другие диковинки, вышедшие из-под пера физиков-теоретиков. Раскрытие тайны невидимок, – пожалуй, одна из самых захватывающих задач современной физики и астрофизики.

Однако, кем бы ни была скрытая масса, совершенно ясно, что ее влияние на структуру и динамику Вселенной чрезвычайно велико. Ведь именно гравитация определяет лицо мира, его сегодняшнее поведение и будущее устройство. Воздействие темной материи, в 10 раз более сильное, чем всех видимых галактик и скоплений, необходимо точно знать и учитывать в космологических моделях.

**Инфляционная эра**

Вторая проблема – короткий, но чрезвычайно важный этап жизни Вселенной, получивший название инфляционной эры. Он самый начальный и настолько мимолетный – всего 10–32 с (!), – что, казалось бы, мог пройти незамеченным. Как бы не так. В это время только что возникшая Вселенная – крохотный пузырек размером меньше атома – стремительно раздувалась (inflation и есть раздувание), вырастая до астрономических размеров.

Необходимость введения инфляционной эры возникла у космологов тогда, когда они осознали невозможность объяснить некоторые парадоксальные свойства реликтового излучения, например, одинаковую температуру далеких друг от друга и потому причинно не связанных частей Вселенной (расстояние между которыми больше пути, проходимого светом за время жизни Вселенной). Разгадка проста: в начале инфляционной эры они-таки были причинно связанными и могли обмениваться сигналами, уравнивая свою температуру, а разошлись так далеко в результате стремительного раздувания.

Инфляционная эра – настоящий Клондайк современной астрофизики. Именно в этот крохотный промежуток времени возникла вся масса Вселенной – как пена на бесконечно глубокой потенциальной энергии вакуума, выделилась огромная энергия, нагревшая вещество до высокой температуры (сделавшая Вселенную горячей), и произошли распады тяжелых частиц, создавшие избыток вещества над антивеществом (протонов, нейтронов и электронов над антипротонами, антинейтронами и позитронами), в результате чего наша Вселенная и состоит только из вещества (после того как аннигилировали – взаимно уничтожились – равные количества частиц и античастиц). Понятен тот огромный интерес, который проявляют к этой «золотой жиле» физики-теоретики. Надо отметить также, что инфляционная эра – самая близкая к моменту Большого Взрыва. Кто знает, какие еще открытия и потрясения ожидают дотошных космоархеологов в этой «долине царей».

**Выбор Вселенной**

Вариантов космологических моделей много, а Вселенная одна. Значит, надо отобрать тот единственный вариант, который был реализован, и наконец понять, в каком Доме мы живем. Почти весь ХХ в. прошел под знаменем этой великой задачи – в поисках тестов выбора правильной модели и их проверок в наблюдениях. Но до сих пор результат остается неопределенным: Вселенная может быть любым из указанных Фридманом типов – открытой, плоской и замкнутой. Мы все еще не знаем в точности устройства, главных параметров и будущего поведения нашего мира. Будет ли Вселенная бесконечно расширяться, или когда-нибудь расширение сменится сжатием и она уйдет в начальную сингулярность? Разве можно спокойно жить, не зная ответа?

На самом деле все не так трагично. Наиболее умудренные космологи уже интуитивно получили ответ и считают, что, скорее всего, мы живем в плоской Вселенной, где средняя плотность вещества (видимого и скрытого) равняется критической, геометрия пространства евклидова и мир в целом не имеет кривизны. К этому их склоняют не только результаты анализа космологических тестов, но и соображения «эстетической красоты», которые так ценил Эйнштейн и которые помогли ему выбрать именно тот вариант теории тяготения (общую теорию относительности), который до сих пор считается лучшим, согласуясь со всеми результатами наблюдений.

Но в науке самый главный критерий истины все же не интуиция (даже самых выдающихся людей, которые тоже иногда ошибаются), а результаты опыта и точного анализа. Поэтому с прежним упорством наблюдатели, получающие в свое распоряжение все более изощренные приборы и методы анализа, продолжают поиски единственного варианта нашего вселенского Дома. На этом пути, кроме уточняющихся результатов старых тестов, появилась в последнее время совершенно новая возможность, связанная с подробными исследованиями температуры реликтового излучения.

**Анизотропия реликтового излучения**

Так ли уж изотропен реликтовый фон? С точностью до 0,01 % он действительно одинаков во всех направлениях, чего достаточно, чтобы отбросить все попытки объяснить его близкими источниками и принять как излучение всей Метагалактики. А что будет, если еще повысить точность измерений?

20 лет назад такой эксперимент провела американская группа на высотном самолете-лаборатории и обнаружила заметную анизотропию реликта: в некоторой области небесной сферы температура излучения была чуть выше – максимальная разница составляла 3,5 мК, а в противоположной – на такую же величину меньше. Был открыт так называемый дипольный компонент анизотропии, получивший очень простое и естественное объяснение. Он обусловлен доплеровским смещением частоты (а значит, и температуры) излучения, принимаемого движущимся наблюдателем. Это тот же эффект, по которому высота гудка приближающегося поезда выше, а удаляющегося – ниже, чем стоящего. Реликтовые фотоны налетают со всех сторон; летящие навстречу наблюдателю окажутся более энергичными, а догоняющие «в хвост» – менее энергичными, чем приходящие сбоку. Этот эксперимент показал, что Земля (вместе с Солнечной системой, Галактикой и другими адресными подструктурами) движется со скоростью 370 км/с относительно далекого вещества, испустившего реликтовое излучение. Сам по себе этот результат очень интересен. Найдена инерциальная система, которую искали в начале века, решая проблему мирового эфира. Тогда опыт Майкельсона показал, что такой системы нет и эфира с приписываемыми ему свойствами упругой среды не существует. Эфир действительно сейчас физике не нужен, но избранная система отсчета (в некотором смысле абсолютная) все же, оказывается, существует.

За вычетом дипольного компонента реликтовое излучение на небесной сфере представляет равномерную «рябь», вызванную статистическими и приборными погрешностями. Конечных значений более мелкой анизотропии долго не находили, пока не были проведены на спутниках уникальные эксперименты РЕЛИКТ (СССР, 1984) и COBE (США, 1992). Первый показал, что более высокие анизотропные компоненты отсутствуют до уровня dТ / Т = 10–5, и этот факт свидетельствовал о большом количестве холодной темной материи (движущейся со скоростями много меньше скорости света). Второй открыл целый спектр анизотропных компонентов, которые, как сыпь, покрывают все небо и имеют весьма большие размеры (1 – 90о). Это следы тех первичных флуктуаций плотности вещества, которые появились в момент рекомбинации плазмы и из которых развились все наблюдаемые структуры Вселенной. Большой размер неоднородностей – аргумент в пользу инфляционной эры, поскольку зарождались они (в темной материи) именно в то далекое время и успели сильно вырасти.

Анизотропия реликтового фона на уровне 20–40 мкК – установленный факт. Ее компоненты, сохранившие отпечатки прошедших эпох, могут сослужить верную службу, став космологическим Розетским камнем в воссоздании истории «давно минувших дней».

Измерения реликтового излучения детекторами на высотных аэростатах подтвердили выводы спутниковых экспериментов и смогли продлить спектр анизотропных компонентов до высоких моментов. Результаты всех опытов приведены на рис. 2.

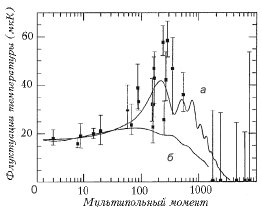


Рис. 2. Спектр неоднородностей (анизотропии) реликтового излучения: по оси абсцисс – мультипольный момент, по оси ординат – температурные флуктуации; точки с погрешностями – экспериментальные данные, кривые – результаты расчета по инфляционной модели (а) и модели топологических дефектов (б)

Точками показаны экспериментальные данные, кривыми – ожидаемые спектры в разных моделях первичных флуктуаций плотности. Хотя ошибки измерений еще очень велики, эксперименты лучше согласуются с предсказанием инфляционной модели (кривая а) и почти наверняка отвергают модель топологических дефектов (кривая б). В расчет заложены все космологические параметры Вселенной и, если измерения будут более точными, особенности расчетного спектра (растущая часть, положение и амплитуды трех пиков, крутой спад) могут быть точно «привязаны», в результате чего параметры станут известны с точностью, недоступной для других космологических тестов (пока неопределенность составляет 50%). Сейчас готовятся два новых прецезионных спутниковых эксперимента: MAP (США, запуск в 2001 г.) и Planck (Европейское космическое агентство, 2007 г.), результаты которых позволят определить параметры Вселенной с точностью до 5% (рис. 3), – и проблема выбора модели будет снята с повестки дня. Трудно переоценить общенаучную важность проводимых исследований – она сопоставима с самыми громкими открытиями прошлых веков, заложившими основы знания об окружающем мире.

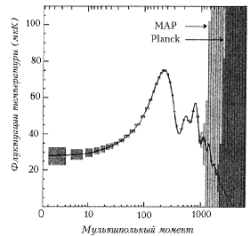


Рис. 3. Тот же спектр анизотропии реликтового излучения, как он будет измерен в экспериментах МАР и Planck для модели плоской Вселенной с определенным набором космологических параметров

А что дальше?

И все же на этом дело не остановится – наука всегда в пути. Уже видны новые проблемы и задачи, которые ставит неугомонная природа. Одной из них, касающейся структуры Вселенной, является проблема «130 Мпк шкалы». Суть ее заключается в том, что скопления галактик и воиды расположены не хаотично, а строго определенно: наблюдается периодичность их чередования с шагом 130 Мпк. Ни из современной теории, ни из модели блинов такая периодичность вовсе не следует. Что это – указание на неизвестные еще детали устройства нашего Дома или следствие чрезмерной подозрительности исследователей – покажут дальнейшие, более точные наблюдения.

К числу беспокоящих (нерешенных или непонятых) проблем относится и так называемый антропный принцип, обсуждаемый с переменным успехом в течение последних десятилетий. Он является формальным ответом на вопрос, почему мировые физические константы так точно «подогнаны» (до нескольких процентов) к тому эволюционному пути, которым прошла Вселенная: Большой Взрыв – расширение Метагалактики – образование звезд, галактик и скоплений – синтез элементов, включая С, N, О, из которых строятся органические вещества – зарождение жизни – появление человека, наблюдателя природы. Согласно антропному принципу, Вселенная устроена таким образом, что в ней обязательно должен появиться наблюдатель. Другие вселенные, с иным набором констант, ненаблюдаемы, т.к. в них эволюционная цепь оборвалась на промежуточном звене: синтез элементов не пошел дальше гелия, не успели образоваться звезды и т.д. Что в действительности кроется за антропным принципом и идеей множества вселенных, пока неясно. Но, как известно, нераскрытых тайн в науке не бывает – будет дан точный ответ и на этот трудный вопрос.

Возможно, нам все-таки придется дополнить свой адрес указанием скопления вселенных или других структурных единиц.

Просто Дом продолжает строиться в нашем сознании, уточняясь и совершенствуясь.