

В. Лукаш

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ

Прогресс астрономии не является результатом кабинетных теоретиков, даже если и помогают суперкомпьютеры; он зависит главным образом от наблюдений и высокоточного оборудования, являющегося последним достижением техники

ВВЕДЕНИЕ

В эпиграфе к этой статье известный английский исследователь Мартин Рис говорит об астрономии, но то же самое и даже с большим основанием можно сказать и об одном из ее бурно развивающихся разделов — космологии.

Среди других астрономических наук космология стоит особняком. Исторически она одна из древнейших наук (наук, а не профессий!) — достаточно вспомнить «Теогонию» Гесиода (VIII—VII века до н. э.). Вместе с тем современное научное обоснование космология получила только в начале XX века — с появлением общей теории относительности (ОТО). Космология изучает Вселенную в целом и относится к группе естественных наук. Поэтому ее теоретические основы должны иметь экспериментальное подтверждение.

Коль скоро в основе космологии лежит ОТО, все эксперименты по ее проверке вносят свою лепту и в обоснование космологии. Однако, имея своей основой ОТО, космология к ней не сводится и, таким образом, имеет собственную наблюдательную базу. Вплоть до начала 90-х годов XX века наблюдательная база космологии развивалась в традиционных для всей астрономии рамках. Вводились в строй все более крупные телескопы, расширялся волновой диапазон наблюдений. Предметом исследования долгое время оставались только галактики и связанные с ними явления — например, квазары. Выявление статистических свойств пространственного распределения галактик (меры того, насколько однородно или неоднородно они распределены во Вселенной и какие иерархические структуры образуют) служило единственным источником наблюдательной информации о параметрах модели Вселенной.

Наблюдения галактик похожи на поиски монеток под фонарем, причем поиск ведет человек близорукий. Вблизи фонаря он легко найдет все монеты (галактики большой и малой светимости). Однако по мере того, как расстояние от источника света увеличивается, задача усложняется: хорошо видны только большие монеты (яркие галактики), и если необходимо собрать всю рассыпанную мелочь (галактики малой светимости), придется наклоняться к земле и методично обшаривать большую площадь.

Качественно новая эра в развитии космологии началась в 1992 году с открытием космологической анизотропии реликтового излучения. В отличие от давно измеренной дипольной анизотропии, связанной с движением Земли в космическом пространстве, космологическая содержит информацию о многих параметрах и процессах во Вселенной. Ценность данных, получаемых при исследовании реликтового излучения, повышается и потому, что она несет информацию об очень ранней стадии расширения Вселенной, когда еще не существовало никаких галактик.

Открытие космологической анизотропии реликтового излучения нарушило информационную «монополию» галактик. В результате удалось ликвидировать многие вырождения космологических параметров (неизбежные при анализе данных какого-то одного типа), значительно повысить точность их определения и перейти к непосредственной проверке наших представлений о Вселенной.

ДОСТИЖЕНИЯ ПОСЛЕДНЕГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Как и всякая наука, космология не стоит на месте — она развивается. То, что десять лет назад было предметом ожесточенных споров и дискуссий, сегодня либо стало твердо установленным фактом, либо отброшено как ошибочная гипотеза.

К числу таких фактов относится в первую очередь то, что полная плотность Вселенной ρ с высокой точностью равна критическому значению $\rho_{кр}$.

В традиционных единицах измерения $\rho_{кр} = 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{см}^{-3}$, а в часто используемых энергетических — $\rho_{кр} \sim 10^{-3} \text{ эВЛ}$.

Классическая космология в том виде, в каком она существовала во времена Эйнштейна и Фридмана, допускала любые значения плотности Вселенной — как больше, так и меньше критического значения, и в этом отношении оно ничем не выделено. Конечно, критическим это значение плотности названо не случайно, а потому, что только при этом значении равняются нулю пространственная кривизна Вселенной и параметр ρ_0 оказывается независимым от времени.

То, что полная плотность всех форм материи близка именно к критическому значению, не стало неожиданностью. Именно эту величину плотности Вселенной большинство теоретиков рассматривало как наиболее вероятную еще с начала 1980-х годов, когда была предложена ныне общепринятая концепция

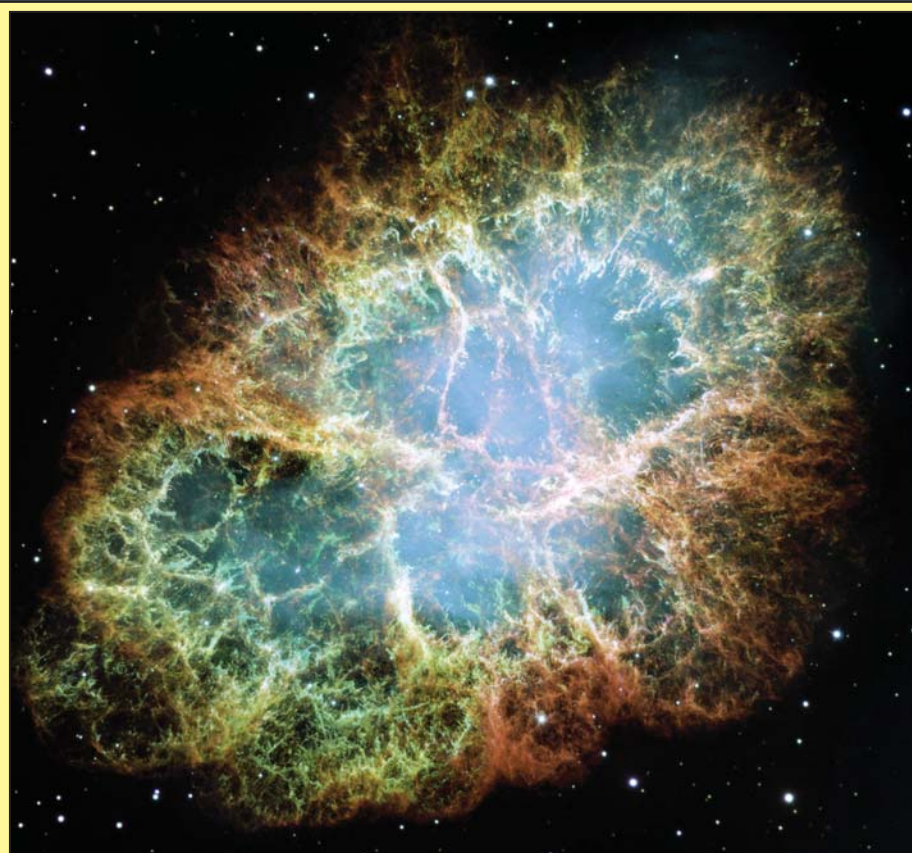
космологической инфляции — модели очень быстрого расширения Вселенной на ранней стадии ее эволюции. Более того, успех инфляционной парадигмы оказался настолько велик, что, если бы в эксперименте было обнаружено статистически значимое отличие плотности Вселенной от критического значения, это стало бы, без сомнения, ошеломляющей и самой важной космологической проблемой.

С инфляцией в экономике сталкивались все, и мало кто может сказать, что это положительное явление. С космологической инфляцией все обстоит наоборот — она успешно решила почти все проблемы классической космологии и существенно понизила актуальность двух-трех оставшихся.

Полная плотность Вселенной, близость которой к единице стала одним из триумфов инфляции, определяется несколькими компонентами различной физической природы — барионами, из которых состоит обычное вещество, так называемым темным веществом, проявляющим себя опосредованно — через гравитационное взаимодействие с барионами. И — обескураживающий результат! — основной вклад в плотность Вселенной вносит так называемая космологическая постоянная (в литературе закрепилось и другое название — лямбда-член, Л-член). По своим свойствам она близка или даже тождественна постоянной Л, введенной Эйнштейном в левую часть известного уравнения ОТО, связывающего геометрию Вселенной с заполняющим мир веществом. Космологическая постоянная по определению не зависит от координат и времени и обычно трактуется как энергия физического вакуума.

То, что обычное вещество не оказывает практически никакого влияния на динамику расширения Вселенной, — давно и твердо установленный факт. Еще в середине 1970-х годов исследование процессов нуклеосинтеза в расширяющейся Вселенной — главным образом, процессов образования ядер дейтерия, лития, изотопов гелия с атомным весом 3 и 4 — показало, что количество образующихся ядер зависит от полного числа барионов. Но и задолго до того, как барионы во Вселенной были «пересчитаны», выяснилось, что гравитирующей материи в несколько раз больше, чем светящейся, а точное их соотношение зависит от типа объекта исследования (галактики, их группы, скопления и т. д.). Например, анализ кривых вращения спиральных галактик показал, что их вид поддается объяснению в рамках общепринятой теории гравитации только в том случае, если предположить наличие в галактике двух гравитирующих подсистем — дисковой (наблюдаемой в виде звезд и излучающего газа) и гораздо более объемной сферической. Причем масса, заключенная в сферической компоненте, больше массы дисковой от двух до десяти раз.

Более того, многократно предпринимавшиеся исследования динамики спирального узора галактик неизменно приводили к выводу, что этот узор стабилен именно из-за наличия вокруг галактики сферически распределенной массы — гало. К аналогичному выводу о существовании сферических гало различного масштаба приходят и при анализе излучения и динамики более массивных объектов — групп и скоплений галактик. При этом



Крабовидная туманность — остатки Сверхновой, вспыхнувшей в 1054 году. Это был самый яркий небесный объект после Солнца: 23 дня Сверхновую видели невооруженным глазом даже днем и еще почти два года ночью. За 950 лет остатки ее вещества образовали расширяющееся облако — туманность

помимо исследования кривых вращения галактик и температуры газа в группах скоплений используются методы, основанные на эффекте гравитационного линзирования света удаленных галактик скоплениями ближнего фона. Окончательную точку в решении этой проблемы поставили недавние исследования анизотропии реликтового излучения, которые определили космологическую плотность темной материи с высокой точностью.

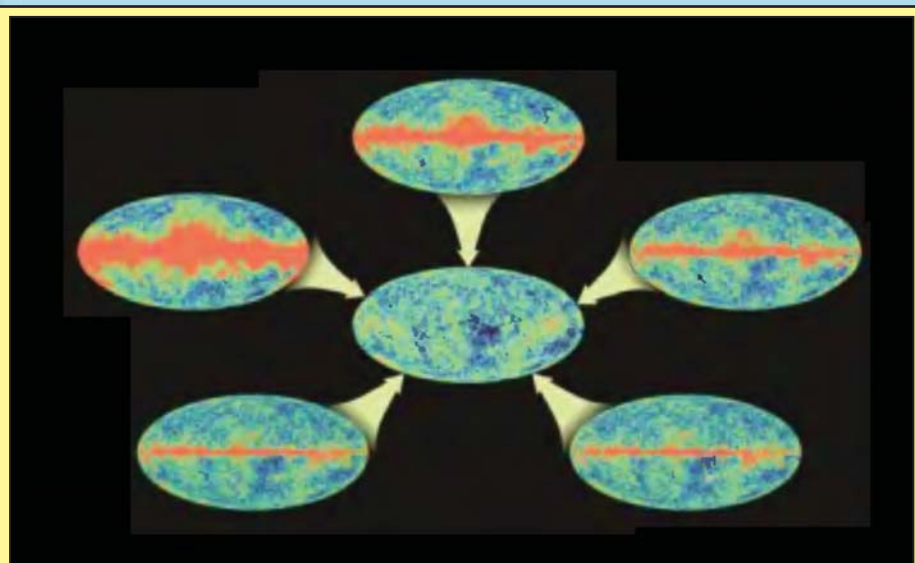
Таким образом, существование темной материи, взаимодействующей с барионами только гравитационно, твердо установленный научный факт. Однако вопрос ее физической природы до сих пор остается открытым. Нельзя сказать, что космологи испытывают дефицит в претендентах на роль частицы темной материи: теоретики, работающие в физике высоких энергий и элементарных частиц, пекут их как пирожки, но экспериментально ни один сорт таких частиц до сих пор не был зарегистрирован.

Если ситуация с частицей скрытой материи принципиально ясна — рано или поздно она будет обнаружена, а с учетом того, сколько сил и средств вкладывается в погоню за результатом, долгожданное открытие может произойти уже в самом ближайшем будущем, то с космологической постоянной все обстоит гораздо сложнее.

Вторая проблема — это сама физическая природа космологической постоянной: эквивалентна ли она той, которую ввел Эйнштейн, или это что-то иное.

Однако ученые предполагают, что мы живем в мире, где таинственная космологическая постоянная тождественна введенной Эйнштейном.

Доминирование во Вселенной космологической постоянной радикальным образом отражается на ее эволюции — такая Вселенная расширяется с ускорением и имеет больший возраст (со всеми вытекающими отсюда последствиями), чем Вселенная, в



Комбинированная карта (пять частотных каналов — 23, 33, 41, 61 и 94 ГГц) анизотропии реликтового излучения по данным спутника WMAP

которой эта постоянная равна нулю. С теоретической точки зрения наличие космологической постоянной пока не имеет серьезных или, по крайней мере, общепринятых обоснований. Скорее ее можно назвать «лишней» величиной — наши представления о Вселенной не изменились бы кардинальным образом, если бы оказалось, что на самом деле космологическая постоянная равна нулю (или так мала, что не может быть определена при существующем уровне техники). Однако космология, как и все естественные науки, строится на фундаменте наблюдательных данных, и эти данные свидетельствуют в пользу ее значительной величины.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ АРГУМЕНТЫ В ПОЛЗУ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

Перечислим основные аргументы в пользу существования космологической постоянной.

Первый — кратко называют «аргументом по Сверхновым». Вообще говоря, вместо Сверхновых можно взять любой объект, удовлетворяющий двум условиям. Во-первых, он должен быть достаточно ярким («пятирублевой монетой» в терминах введения), чтобы его можно было увидеть с большого расстояния, и, во-вторых, его светимость не должна зависеть от конкретного представителя (все монеты должны быть одинаково чистыми). Если объект является такой «стандартной свечой», не представляет труда вычислить его яркость на любом расстоянии и в рамках любой космологической модели.

После этого, сопоставив теоретические расчеты с реальными наблюдениями, можно определить параметры Вселенной. Многолетние поиски такой стандартной свечи привели к тому, что в настоящее время в этом качестве используют Сверхновые звезды типа 1a, а анализ кривых светимости выявил значительную по величине космологическую постоянную.

Сверхновая (любого типа) не объект, а явление, в данном случае — явление взрыва звезды-прародителя. Согласно современным представлениям, этот прародитель — так называемый белый карлик с массой, превышающей пороговое значение — 1,4 *М_с* (массы Солнца), до которого такая звезда еще остается устойчивой. Внешним источником падающей массы служит звезда (например, гигант, заполнивший в ходе своей эволюции полость Роша) — компаньон двойной (или кратной) звездной системы. Вплоть до критического значения массы силы гравитации, действующие в звезде, уравновешиваются давлением вырожденного электронного газа. При дальнейшем увеличе-

нии массы электронное давление оказывается недостаточным и происходит коллапс (и взрыв) звезды. Однако этот взрыв выглядит простым только в кратком изложении: до сих пор физические процессы, протекающие в такой звезде, из-за своей сложности остаются недостаточно изученными. Более того, до сих пор не существует последовательной теории взрыва белого карлика.

То, что прародители Сверхновых типа 1a принадлежат к одному классу звезд и находятся в узком диапазоне масс, само по себе не служит обоснованием того, что Сверхновые могут служить стандартными свечами. Прежде всего, то, как вспышка Сверхновой наблюдается на Земле, зависит от свойств межзвездной среды, через которую распространяется излучение. Если среда содержит много пыли, свет, исходящий от Сверхновой, испытывает значительное поглощение,

что в конечном счете может внести значительную ошибку в величины и/или точность определяемых таким методом космологических параметров.

Другая внутренняя проблема теста по Сверхновым — разный химический состав близких и удаленных Сверхновых. В самом деле, различие между кривыми, описывающими связь между видимой звездной величиной и красным смещением в разных космологических моделях, увеличивается с ростом красного смещения, на котором мы наблюдаем Сверхновые. Наличие систематического эффекта, зависящего от красного смещения, может стать серьезным препятствием на пути восстановления космологической модели.

Следующий аргумент в пользу значительной космологической постоянной — это наблюдаемая при разных величинах красного смещения эволюция числа скоплений галактик. С одной стороны, ее определяет темп роста амплитуды возмущений плотности вещества (которая, в свою очередь, зависит от космологической модели), а с другой — общее число скоплений нормируется на современную эпоху. Поэтому, несмотря на то, что рост возмущений во Вселенной с большой космологической постоянной сильно подавлен, число скоплений галактик в прошлом оказывается выше, чем во Вселенной, где космологическая постоянная равна нулю*.

**В мире с конечной скоростью света в принципе можно заглянуть в прошлое Вселенной: наблюдая удаленные объекты, мы видим их такими, какими они были в момент испускания приходящего к нам кванта света, а поскольку расстояния до космологических объектов огромные, то и «возможность» заглянуть в прошлое соответствующая.*

Третий аргумент — это наблюдаемый эффект Сакса-Вольфа, устанавливающий связь между угловой анизотропией реликтового излучения и возмущениями гравитационного потенциала на пути распространения реликтового фотона от момента излучения до момента его приема. Традиционно этот эффект описывают как совокупность нескольких слагаемых, одно из которых — интегральный эффект Сакса-Вольфа — вызвано смещением частоты кванта под влиянием переменного гравитационного поля формирующейся крупномасштабной структуры Вселенной. Эволюция гравитационного потенциала на линейной стадии образования первичных скоплений и сверхскоплений галактик существенно зависит от наличия (и, конечно, величины)

космологической постоянной. Если во Вселенной доминирует вещество, гравитационный потенциал не зависит от времени. В этом случае интегральный эффект Сакса-Вольфа равен нулю — реликтовый квант не испытывает дополнительного смещения частоты при прохождении гравитационных «ям» и «хребтов» близлежащей структуры Вселенной. В обратном случае, если космологическая постоянная достаточно велика и влияет на темп расширения сегодняшней Вселенной, поле возмущений гравитационного потенциала на пути распространения фотона успевает измениться (уменьшиться) за время его прохождения, что и ответственно за появление эффекта. Таким образом, интегральный эффект Сакса-Вольфа во Вселенной с большой космологической постоянной приводит к появлению дополнительной анизотропии реликтового излучения, антикоррелирующей с крупномасштабным распределением галактик вокруг нас (квант испытывает красное/синее смещение в направлениях концентраций/деконцентраций галактик), что и выявляется при анализе данных наблюдений.

И, наконец, четвертый (и главный!) аргумент в пользу космологической постоянной — структурный.

Основными источниками наших знаний о структуре Вселенной служат, во-первых, пространственное распределение светящейся материи (галактик, их групп, скоплений и т. д.) и, во-вторых, анизотропия реликтового излучения. Оба этих «источника» чувствительны к количеству вещества во Вселенной, но характер этой зависимости несколько различен, что и позволяет восстанавливать величину плотности материи (а значит, и величину космологической постоянной) с высокой точностью.

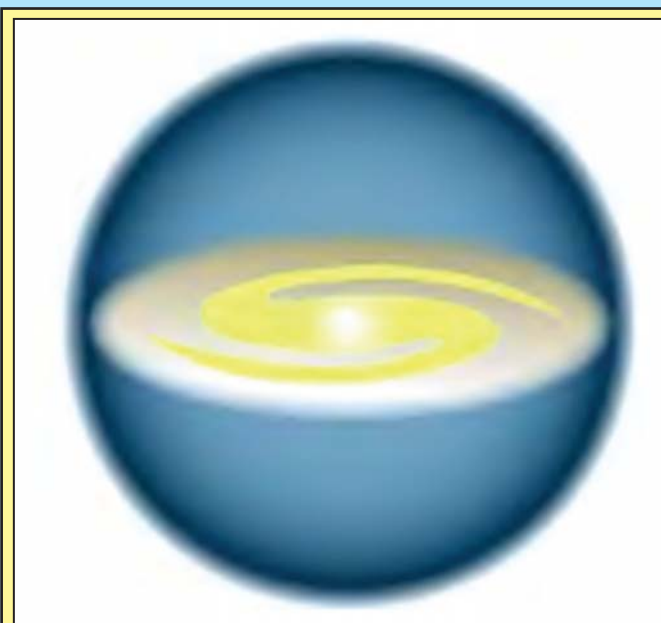
Так, характерным масштабом, «впечатанным» в пространственное распределение материи вокруг нас, оказывается масштаб, совпадающий с космологическим горизонтом на ранней стадии расширения Вселенной, когда плотность энергии излучения сравнялась с плотностью материи. В тот момент времени (около 13 млрд лет назад) эпоха доминирования излучения сменялась эпохой доминирования материи, что вело к смене темпа расширения Вселенной и к изменению скорости роста возмущений.

Измерение анизотропии реликтового излучения позволяет определить величину плотности вещества во Вселенной, которая оказывается меньше единицы с высокой степенью достоверности (наблюдательные данные о пространственном распределении вещества — самые точные в современной космологии!). А поскольку данные о мелкомасштабной анизотропии реликтового излучения позволяют однозначно утверждать, что суммарная плотность всех форм материи во Вселенной равна единице (об этом мы уже упоминали в начале статьи), мы приходим к выводу: существует компонента материи, которая не принимает участия в гравитационном сгущении. Такой компонентой может быть только космологическая постоянная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы живем в мире, динамикой расширения которого управляет неизвестная нам форма материи. Единственное, что мы достоверно знаем о ней — это факт ее существования и уравнение ее состояния вакуумоподобного типа. Нам неизвестно, изменяется ли уравнение состояния темной энергии со временем и если изменяется, то как. Это значит, что все рассуждения о будущем Вселенной по сути спекулятивны (то есть умозрительны) и основаны на эстетических воззрениях их авторов.

В космологии есть и другие задачи, требующие разрешения. Прежде всего, это вопрос о природе темного вещества, входящего в состав всех гравитационно связанных систем во Вселенной, хотя, в отличие от космологической постоянной, о темном веществе мы знаем гораздо больше, и ответ, без сомнения, вскоре будет получен.



Видимую часть спиральной галактики образуют звезды и горячий излучающий газ. Их окружает сферическое облако темной материи, которая не видна, а проявляет себя только через гравитационное взаимодействие

На повестке дня в космологии стоят и другие интереснейшие загадки, требующие разрешения: происхождение первых галактик и квазаров, проблемы начала и образования Вселенной, иерархии частиц и взаимодействий и другие. Объем наших знаний о Вселенной растет быстрыми темпами, но чем больше мы узнаем об окружающем мире, тем больше возникает новых вопросов. Это нормальный путь развития науки, в особенности наиболее быстро развивающейся ее области — космологии.

ПОДРОБНОСТИ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ

Квазар — квазизвездный (звездopodobный) объект. Впервые квазары были открыты в 1967 году. Долгое время их спектры не удавалось идентифицировать ни с каким типом объектов, пока наконец не обнаружилось, что квазары — это активные ядра галактик, удаляющихся от нас с огромными скоростями, так что их спектры испытывают значительное красное смещение космологической природы.

Поскольку квазары — весьма яркие объекты, их видно с очень больших расстояний, сопоставимых с размером Вселенной. Это позволяет использовать их пространственное распределение для восстановления распределения материи во Вселенной и ее временной эволюции.

Барионы (от греческого барос — тяжесть) — группа «тяжелых» элементарных частиц с массой не меньше массы протона и полудельным спином. К барионам относятся протоны и нейтроны, а также ряд нестабильных частиц (гипероны, барионные резонансы, имеющие время жизни порядка 10^{-23} секунды). Нейтрон стабилен только в составе устойчивых атомных ядер; в свободном состоянии он распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино в среднем за 16 минут.

Реликтовое излучение — электромагнитное излучение, «оставшееся» от эпохи доминирования излучения во Вселенной. Спектр реликтового излучения чрезвычайно близок к спектру абсолютно черного тела с температурой 2,7 Кельвина. Количество квантов этого излучения огромно — 10^9 на барион, однако космологическая плотность заключенной в них энергии очень мала и составляет около 10% от полной плотности всех видов материи.

