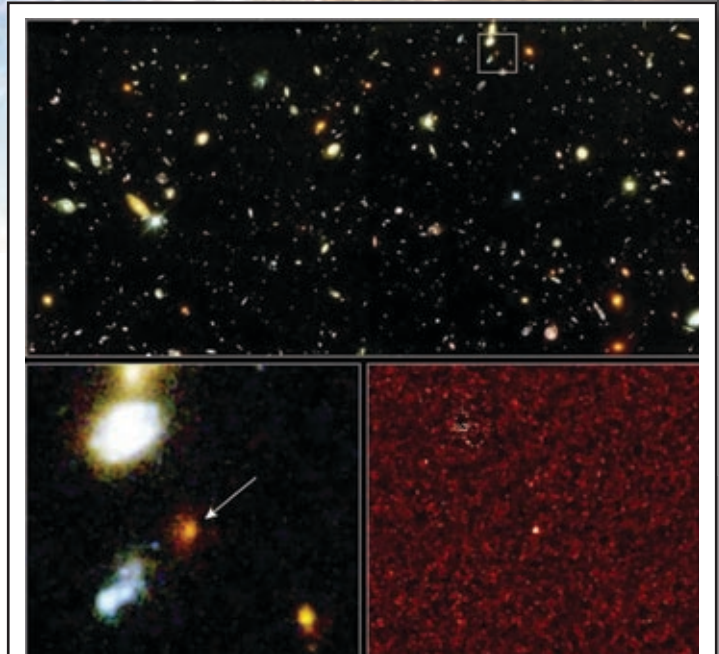


А. Кондюков

«ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ» — СЮРПРИЗЫ ПРОДОЛЖАЮТСЯ

«НиТ» уже несколько раз обращался к теме самой животрепещущей проблемы современной астрофизики — проблемы существования и обнаружения «темной материи» и «темной энергии». Но вместе с тем, что все больше и больше фактов начинают свидетельствовать о ее наличии и, более того — о ее обнаружении, начинает расти и список вопросов, которые встают перед исследователями самой большой (на сегодняшний день) тайны Вселенной. Так несколько лет назад астрофизики обнаружили интригующий факт. Результаты наблюдений за далекими сверхновыми звездами показали, что Вселенная расширяется заметно быстрее, чем ей «предписывает» общепринятая теория: ее как бы «распирает» некая сила, о природе которой почти ничего неизвестно. Предполагается только, что она представляет собой остатки некоего поля, существовавшего в первые мгновения жизни Вселенной, которых, однако, хватает, чтобы повлиять на ее дальнейшую судьбу.

Недавно была сформулирована новая версия стандартной космологической модели Вселенной, названная «космическим согласием». Она описывает широкий круг явлений в рамках теперь уже надежно обоснованной модели горячей Вселенной, ведущей начало с так называемого Большого взрыва. Согласно этой версии, вся материя состоит из трех основных компонент: барионной (в основном это нуклоны и гипероны), которую описывает общепринятая модель элементарных частиц; небарионной темной материи, предположительно представленной либо неизвестными еще почти невзаимодействующими массивными частицами, либо гипотетическими аксионами — очень легкими и тоже очень слабо связанными с барионами частицами с нулевым спином, существование которых также не противоречит основам современной квантовой теории; и, наконец, — в этом как раз и состоит довольно неожиданный сюрприз — темной энергии, относительно физической природы которой мы практически еще ничего не знаем. При этом на долю барионов приходится всего лишь около 4% всей массы (здесь масса M понимается в релятивистском смысле как $M = E/c^2$, где E — полная энергия, а c — скорость света, причем обычно пользуются системой единиц, в которой $c = 1$). Часть барионов — тоже «темная», а точнее холодная, в том смысле, что не обнаруживает себя непосредственно светом раскаленных звезд. Темная материя составляет примерно 20...25% всей массы. Львиная же доля — 70...75% всей массы — приходится на темную энергию, которая пока обнаруживает себя только тем, что влияет на скорость глобального расширения Вселенной. Эта фоновая энергия распределена равномерно, во всяком случае, в пространственных масштабах, превышающих размеры всех известных неоднородностей (скажем, скоплений галактик). Представление о темной энергии возникло в 1998 году и связано с наблюдениями за сверхновыми звездами, которые время от времени ярко вспыхивают на небосклоне и затем довольно быстро туск-



Снимки наиболее удаленной сверхновой, сделанные космическим телескопом Хаббл. Наряду с другими они послужили обоснованием гипотезы о существовании темной энергии. Вверху — часть звездного неба вблизи сверхновой 1997ff; слева — вид галактики, в которой она находится (указана стрелкой); справа — эта же, но уже затухающая сверхновая

неют. Благодаря своим уникальным свойствам эти звезды используют в качестве маркеров для определения того, как космологические расстояния изменяются со временем. Так вот, в 1998 году две группы астрофизиков — одна в США, а другая в Австралии — почти одновременно обнаружили, что самые далекие сверхновые светят не так ярко, как это ожидалось, исходя из того, что Вселенная заполнена материей, гравитирующей по закону Ньютона, то есть обратно пропорционально квадрату расстояния. Это означало, что они расположены от нас дальше, чем должны были бы находиться, если бы Вселенная расширялась в поле обычных гравитационных сил. Таким образом, с достоверностью 99% можно утверждать, что во Вселенной должна быть еще какая-то дополнительная энергия, способная на космологических расстояниях противостоять гравитационному Притяжению материи. Она и есть то, что стали понимать под словами «темная энергия».

С тех пор получено множество новых свидетельств в пользу данного утверждения — как в ходе дальнейших и более надежных наблюдений за сверхновыми, так и в результате ряда других исследований. Таковыми были, прежде всего, детальные измерения энергетического спектра реликтового излучения в наземных лабораториях и со

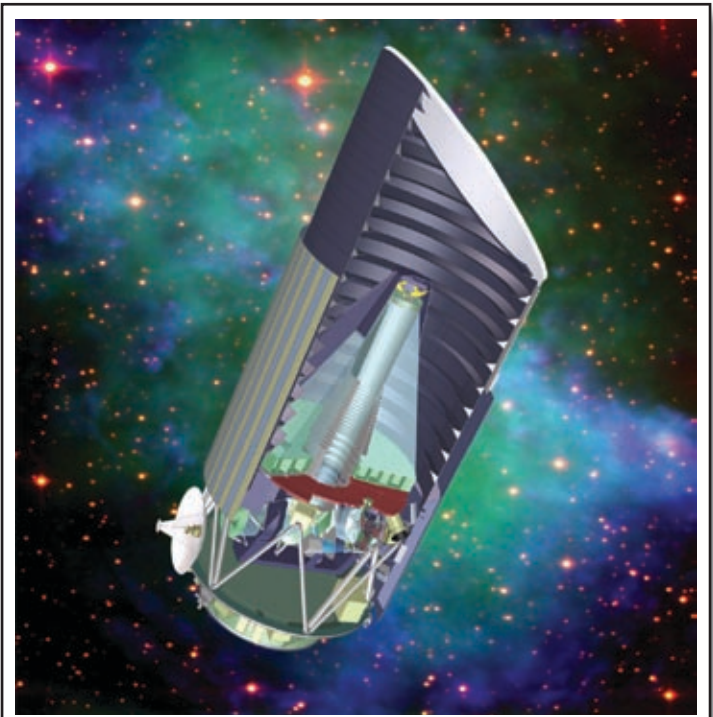
спутников. Эти же эксперименты показали, что Вселенная плоская (во всяком случае — почти), то есть ее видимая пространственная геометрия эвклидова, что согласуется с предсказанием инфляционной модели. В то же время наблюдения за скоплениями галактик говорят о том, что обычная материя (барионная и темная) может обеспечить всего лишь 20—30% необходимой для этого средней плотности энергии. Таким образом, все сходится к тому, что около трех четвертей этой плотности следует отнести на счет темной энергии, которая и ускоряет расширение Вселенной.

О ПРИРОДЕ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ

Откуда же все-таки берется эта темная энергия? Вразумительного ответа на этот вопрос пока нет, но обычно его пытаются найти, комбинируя уравнения общей теории относительности (ОТО) с уравнениями состояния вещества, о которых для начала поговорим вкратце. Под уравнениями состояния вещества понимается взаимозависимость между плотностью полной энергии ϵ и давлением p . Простейшим примером является уравнение Клапейрона для идеального газа $p = 2/3 k \epsilon_k = 2/3 k (\epsilon - p)$, где k — постоянная Больцмана, ϵ_k — плотность кинетической энергии и p — плотность массы покоя.

В нерелятивистской среде (где величина массы намного превышает кинетическую энергию частиц) давление ничтожно мало по сравнению с плотностью полной энергии, так что в данном контексте его можно с очень хорошей точностью считать просто равным нулю. В релятивистской среде (когда, наоборот, кинетическая энергия намного больше массы покоя) плотность энергии всего лишь втрое больше давления, $\epsilon = 3p$. А в вакууме сумма $\epsilon + p = 0$, то есть они отличаются только знаком (иначе говоря, $\epsilon/p = -1$).

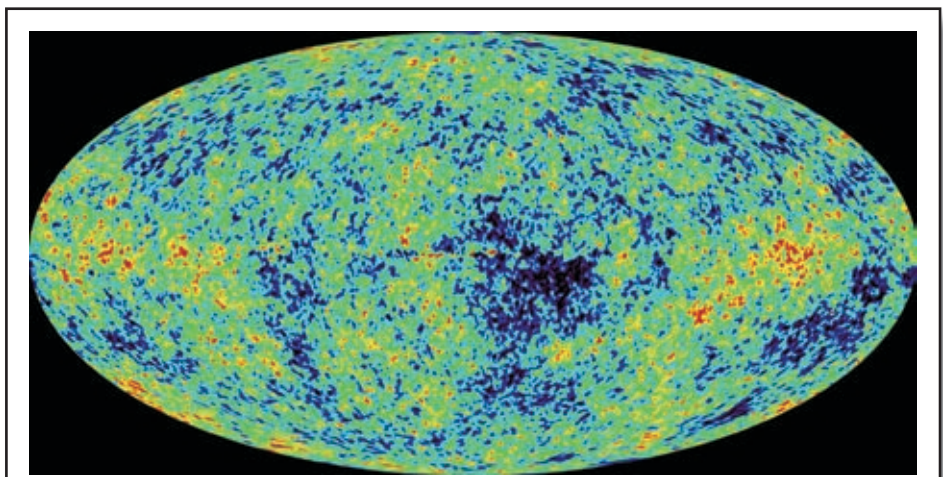
Последнее прямо вытекает из того, что по самому своему смыслу вакуум должен быть релятивистски инвариантным, то есть выглядеть одинаково во всех системах координат, а упомянутое только что уравнение состояния — единственное, которое удовлетворяет этому требованию. На первый взгляд кажется, что в вакууме вообще «ничего нет», и, стало быть, просто $\epsilon = p = 0$. Но такие «естественные» аргументы проходят только в рамках классической теории. Уже давно и хорошо известно, что плотность энергии квантового вакуума может отличаться от нуля и притом весьма значительно. Теперь обратимся к уравнениям ОТО. В них давление само «гравитирует», то есть в определенном смысле становится эквивалентным массе (энергии), и знак полного гравитационного взаимодействия определяется знаком суммы $\epsilon + 3p$. Если он положителен — а это, очевидно, так для любой среды, кроме вакуума, — имеет место хорошо знакомое нам притяжение. А вот в вакууме может быть что угодно: там $\epsilon_{\text{вак}} + p_{\text{вак}} = 0$, так что $\epsilon + 3p = 2p$, и все зависит от знака давления. Если $p_{\text{вак}} \geq 0$ (и, значит, $\epsilon_{\text{вак}} \leq 0$), то качественно мало что меняется: вакуум или не повлияет никак, или же добавит в «общий котел» некоторое дополнительное равномерно размазанное по Вселенной притяжение. Но



Орбитальная лаборатория SNAP (Supernova/Acceleration Probe). Двухметровый телескоп очень точно определяет положение сверхновых, удаленных от нас на 10 с лишним миллиардов световых лет. Сверхчувствительные широкоугольная видекамера и прецизионный спектрограф весьма точно устанавливают их характеристики, производя тем самым калибровку в качестве «стандартных свечек» (эталонных светимости)

если $p_{\text{вак}} < 0$ (и, значит, $\epsilon_{\text{вак}} > 0$), то вакуум привнесет в этот «общий котел» антигравитационную составляющую — отталкивание, что совсем небезобидно. Дело в том, что, будучи равномерно размазанной по всему пространству, она с ростом расстояния станет все сильнее подавлять притяжение «локализованной» материи и рано или поздно обязательно возобладает в суммарном вкладе по всему объему, обеспечив, таким образом, выталкивание (а не притяжение!) материи за его пределы!

По существу, именно это соображение положено в



Пространственная структура реликтового излучения, заполняющего Вселенную. Детальный анализ анизотропии его энергетического спектра, то есть различий в энергии излучения по направлениям (показаны цветом), поможет узнать больше о природе темной энергии

основу инфляционной модели, утверждающей, что в очень ранней Вселенной абсолютно доминировала огромная (положительная!) энергия вакуума, который по этой причине стремительно раздувался, а вещество появилось лишь позднее.

Формально такой режим можно смоделировать математически, введя в уравнения ОТО положительную космологическую константу. Вакуум ОТО с ненулевой космологической константой давно и детально изучен и известен под названием «мир де-Ситтера». Его свойства весьма интересны и во многом парадоксальны, но их обсуждение у вело бы нас в сторону. Интересно, однако, то, что уравнения ОТО с положительной космологической константой, включающие в себя не только гравитацию, но и антигравитацию, могли бы на первый взгляд пролить свет если не на физический смысл, то хотя бы на определенную математическую интерпретацию темной энергии. Но тут мы оказываемся перед лицом почти неразрешимой проблемы.

Дело в том, что величина космологической константы, необходимая для объяснения наблюдаемых размеров Вселенной с помощью инфляционной модели, настолько велика, что сейчас темная энергия должна была бы превышать энергию, связанную с обычной материей, примерно на 120 порядков (то есть быть в 10^{120} раз больше!). А между тем она, как уже упоминалось, хотя и больше, но все-таки имеет тот же порядок величины.

Конечно, в результате фазового перехода с перестройкой вакуума, который почти несомненно случился в ранней Вселенной, космологическая константа могла измениться (и наверняка изменилась), но все же пока совершенно непонятно, как и почему произошла столь «тонкая настройка», что она уменьшилась именно на 120 порядков, а не, скажем, в 10 или 100 раз.

Есть множество указаний на то, что уравнение состояния темной энергии менялось со временем, так что для воссоздания достаточно полной картины необходимо накопить информацию, относящуюся ко всем эпохам эволюции Вселенной. Иначе говоря, нужно «просканировать» уравнение ее состояния по соответствующим величинам красного смещения, которое возникает в результате эффекта Доплера. Таким образом, космологи получают информацию о замедлении расширения Вселенной вследствие притяжения материи и об его ускорении темной вакуумной энергией в различные исторические периоды подобно тому, как сведения об изменении климата на Земле черпают из наблюдений за шириной колец на спилах деревьев.

Здесь решающая роль отводится сверхновым звездам, видимая яркость которых позволяет довольно точно судить об их удаленности от нас и, значит, о моменте их взрыва, а красное смещение в спектрах — это не что иное, как соотношение размеров Вселенной сейчас и в то время. Взятые в совокупности, они дадут полное представление о характере эволюции Вселенной.

Второе направление перспективных исследований включает накопление данных о возрастании скорости формирования крупномасштабных структур во Вселенной типа скоплений галактик. И, наконец, третье направление — это выявление чрезвычайно малых пространственных флуктуации темной энергии по сверхточному (прецизионному) измерению столь же мизерной анизотропии спектра реликтового излучения.

Возможности последних двух направлений серьезно ограничены естественными неопределенностями, неизбежно присущими астрофизике и космической статистике (в частности, тем, что в нашем распоряжении имеется, увы! — только одна Вселенная; хорошо известно, что эта

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Барioni — элементарные частицы, обладающие (в отличие от всех других) так называемым барионным зарядом. Как показывает опыт, барионный заряд изолированной системы сохраняется точно или с очень высокой степенью точности, хотя причина этого неизвестна. Наиболее известные примеры барионов — протоны и нейтроны с барионным зарядом +1, а также соответствующие античастицы — антибарионы, барионный заряд которых равен -1.

Гипероны — «странные» барионы, иначе говоря — барионы, содержащие хотя бы один странный кварк.

Инфляционная модель — сценарий, в котором предполагается, что в первые мгновения своего существования Вселенная представляла собой «ложный вакуум» — метастабильное состояние без реальных частиц, которое не превратилось сразу же в реальный физический вакуум только потому, что для этого необходимо было преодолеть некоторый потенциальный барьер. Этот вакуум расширялся с огромной скоростью и, туннелируя через упомянутый барьер (напомним, что, в отличие от классической, квантовая механика этого не запрещает — пример тому спонтанное деление ядер и многие переходы в твердых телах), «сваливался» в реальный физический вакуум, энергия которого значительно ниже. В результате выделилась громадная энергия, произошел сильнейший разогрев, и во Вселенной появились реальные частицы (в соответствии с обычными законами термодинамики). С этого времени началось и происходит сейчас ее расширение (несравненно более медленное) и постепенное остывание (конечно, «в среднем»), как это качественно и предсказывает общепринятая модель горячей Вселенной.

Нулевые колебания — чисто квантовый эффект, означающий, что энергия частицы или поля нельзя понизить точно до нуля. В случае полей их энергия формально вообще бесконечна. Поскольку обычно всегда играют роль только разности энергий, эта энергия во всех расчетах сокращается. Однако в ОТО энергия приобретает абсолютный смысл.

Мир де-ситтера — так принято называть решения уравнений ОТО с космологической постоянной, которые описывают вакуумное состояние. Свойства последнего зависят от знака этой постоянной и сильно отличают его от «пустого вакуума».

Космологическая постоянная — величина, известная также под названием Λ -члена. Присутствие такого слагаемого в уравнениях ОТО ничем не запрещено, и в начале Эйнштейн считал его даже необходимым, так как без него стационарная Вселенная с одним только притяжением явно неустойчива. Когда же было найдено нестационарное решение ОТО (фридмановская расширяющаяся Вселенная), и тем более когда выяснилось, что именно оно отвечает реальности, необходимость в Λ -члене для внутренне непротиворечивого описания современной Вселенной, казалось бы, отпала. И вот теперь вопрос снова оказался на повестке дня.

Красное смещение — эффект Доплера, который состоит в том, что частота видимого света (и вообще принимаемых электромагнитных волн) зависит от относительной скорости излучателя и приемника: чем быстрее они удаляются друг от друга, тем она меньше. В горячей Вселенной относительные скорости всех тел (на космологических расстояниях) тем больше, чем дальше они одно от другого. В результате оказывается, что принимаемая нами частота уменьшается (по сравнению с частотой неподвижного источника) во столько же раз, во сколько раз масштабы Вселенной в момент излучения были меньше, чем сейчас. Этот фактор принято записывать в виде $(1+z)$, потому что тогда z — это красное смещение, относительное удлинение электромагнитной волны.

Масса покоя (она же и энергия покоя в системе единиц, где скорость света $c = 1$) — это масса (энергия) неподвижного тела; полная (релятивистская) масса (энергия) равна массе покоя + кинетическая энергия тела.

«досадная недоработка природы» сильно сковывает руки и в исследовании ряда смежных вопросов).

В реализации всей этой грандиозной программы и состоит самая фундаментальная задача космологии на ближайшие годы. Дальнейшие исследования должны также ограничить произвол в выборе параметров различных теоретических моделей и предсказать более определенно судьбу нашей Вселенной.

