

ЧТО ТАКОЕ КОСМИЧЕСКАЯ ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ?

А.Д. Чернин

WHAT IS COSMIC DARK ENERGY?

A.D. Chernin

Введение

Мы живем в расширяющейся Вселенной. Об этом первым сказал петербургский математик Александр Александрович Фридман в 1922–1924 гг. Грандиозный феномен космологического расширения мы наблюдаем как движение самых далеких галактик, которые удаляются от нас с огромными скоростями, сравнимыми со скоростью света. В 1998–1999 гг. две международные группы астрономов-наблюдателей, одной из которых руководили Брайан Шмидт и Адам Райсс, а другой Сол Перлматтер, обнаружили, что космологическое расширение происходит с ускорением: скорости удаления галактик возрастают со временем. В 2011 г. это открытие было отмечено Нобелевской премией по физике.

Прежде считалось, что разбегание галактик может только замедляться со временем под действием притяжения галактик друг к другу. Но ускоряющееся разбегание означает, что на галактики действует не только всемирное тяготение, но и всемирное антитяготение, всеобщее отталкивание, которое стремится удалить галактики друг от друга. Более того, антитяготение преобладает над тяготением в глобальном космологическом масштабе. Антитяготение создается не галактиками, а особым физическим агентом, который для наглядности можно представить себе в виде некоей особой космической среды, в которую погружены все галактики, да и вообще все тела Вселенной. Эта среда получила название темной энергии. Темная энергия «темна» по крайней мере в двух смыслах. Во-первых, она невидима – не излучает света, не поглощает и не отражает его. Во-вторых, ее физическая природа и микроскопическая структура полностью неизвестны. Это самая актуальная, как многие сейчас считают, из всех проблем фундаментальной физики 21-го века.

Идея всемирного антитяготения принадлежит Эйнштейну. В космологической модели, построенной им в 1917 г., через два года после создания общей теории относительности, притяжение космических тел друг к другу... отсутствовало. Ньютоново всемирное тяготение при этом, однако, не отменялось; но помимо него в эйнштейновской модели действовал еще один столь же универсальный силовой фактор – всемирное антитяготение, которое точно компенсировало взаимное тяготение космических тел в масштабе всей Вселенной как целого. Ничего подобного старая доэйнштейновская физика не знала. Но антитяготение не вытекало в действительности и из общей теории относительности как таковой. Это была совершенно новая идея. Тем не менее она органично и в исключительно экономной форме была инкорпорирована в структуру общей теории относительности, в систему ее математических уравнений.

Антитяготение было представлено в этих уравнениях всего одной, и притом постоянной, физической величиной, которая получила позднее название космологической константы. Она обеспечивала в модели Эйнштейна точную компенсацию всемирного тяготения, так что результирующая сила, которую испытывало каждое космическое тело, была равна нулю. По этой причине все эти тела находились в покое и Вселенная как целое была статической – вечной и неизменной во времени.

Эйнштейновское антитяготение присутствовало и в космологической теории Фридмана; но в ней не было точной компенсации тяготения антитяготением. Во Вселенной Фридмана антитяготение могло быть и слабее тяготения, и, при определенных условиях, сильнее его. После открытия космического ускорения фридмановская теория космологического расширения – в том ее варианте, в котором в современном наблюдаемом состоянии Вселенной преобладает антитяготение, – стала стандартной космологической моделью сегодняшнего дня. Она очень хорошо описывает сам феномен ускоряющегося космологического расширения и прекрасно согласуется со всем комплексом современных наблюдательных данных о Вселенной как целом.

Одно из фундаментальных следствий теории расширяющегося мира – вывод о том, что Вселенная существует не вечно, она возникла в отдаленную эпоху в прошлом, так что ее современный возраст, отсчитываемый от этой эпохи, измеряется некоторой конечной величиной. Проявив необычайную научную смелость и редкую физическую интуицию, Фридман нашел численную оценку современного возраста мира. Он исходил из весьма скудных астрономических сведений, которыми тогда, в 1922–1924 гг., располагали первые космологи, и сказал, что мир возник примерно «десять миллиардов наших обычных земных лет назад», если считать по порядку величины (т. е. с точностью до степени десятки в численном выражении для этой величины). Это была первая и притом успешная, как оказалось, количественная оценка ключевой физической величины космологического масштаба. После открытия темной энергии возраст мира удалось измерить с впечатляющей точностью – до трех значащих цифр: он составляет 13.7 миллиардов лет; но это и есть десять миллиардов лет с точностью до порядка величины.

Из теории Фридмана вытекал целый ряд и других следствий, в том числе и тех, что допускали непосредственную проверку в астрономических наблюдениях. Самое важное из них – закон космологического расширения. В простейшем случае (когда расстояния не слишком велики) он гласит: скорость удаления от нас галактики прямо пропорциональна

расстоянию до нее. Этот закон записывают в виде формулы $V=HR$, где V – скорость удаления галактики, R – расстояние до нее, H – величина, которая не зависит ни от расстояния до галактики, ни от направления на нее на небе. Этому результату предстояло сыграть немалую роль в дальнейших космологических исследованиях.

Вселенная как целое

Теория Фридмана (а с ней и современная стандартная космологическая модель) предполагает, что распределение вещества во Вселенной является однородным. Так оно на самом деле и есть. Но эта однородность имеет место лишь в среднем по большому – глобальному – пространственному масштабам. Вообще же космическое вещество собрано в более или менее изолированные сгустки различных размеров и масс: это планеты, звезды, галактики, группы и скопления галактик. Планеты обращаются вокруг своих звезд, звезды собраны в галактики, большинство галактик входит в группы и скопления, а скопления образуют самые большие по протяженности сгущения вещества в природе – сверхскопления, которые представляют собой уплощенные образования (космические «блины», по словам Я.Б. Зельдовича), содержащие несколько скоплений галактик. Чаще всего сверхскопления соединяются между собой цепочками галактик и скоплений; эти цепочки называют филаментами. Размеры типичных сверхскоплений и филаментов измеряются примерно сотней мегапарсек. Более крупных по размерам и массе сгущений вещества во Вселенной не существует: иерархия астрономических систем обрывается на сверхскоплениях и филаментах.

Последнее не означает, однако, что эти крупнейшие космические образования разбросаны в пространстве мира произвольно и беспорядочно. Сверхскопления и филаменты организованы, упорядочены и выстроены в глобальную квазипериодическую структуру, которую сейчас называют космической паутиной. Она действительно похожа на паутину, а также и на пчелиные соты, на кристаллическую решетку или на гигантские трехмерные кружева, в которых имеются более или менее регулярно повторяющиеся пустоты («войды»), очерчиваемые сверхскоплениями и филаментами. Этот вселенского масштаба космический узор впервые распознали по данным наблюдений Я.Э. Эйнаста и его ученики в Тартуской астрономической обсерватории еще в конце 1970-х гг. Тогда же Я.Б. Зельдович вместе с А.Г. Дорошкевичем и другими сотрудниками его космологической группы предложил первую теоретическую модель, объясняющую происхождение, строение и эволюцию крупномасштабной космической паутины.

С середины 1990-х гг. прогресс астрономической техники сделал доступными для наблюдений огромные объемы космического пространства с размерами в тысячи мегапарсек, т.е. несколько гигапарсек (Гпк), содержащие сотни и тысячи войдов, сверхскоплений и филаментов. Это стало возможным в первую очередь благодаря космическому телескопу «Хаббл», который уже два десятка лет на-

ходится на орбите вокруг Земли, а также гигантским новейшим наземным телескопам с зеркалами диаметром в 8–10 м. Вселенная впервые предстала перед нами в таком гигантском пространственном масштабе, что мы увидели ее как некое целое, когда уже теряются из виду такие «детали» ее устройства как сгущения и разрежения вещества любых масштабов, даже самых крупных. Оказалось, что в каждом из объемов с поперечником, скажем, в 3 Гпк полное число войдов, сверхскоплений и филаментов практически одинаково, где бы в пространстве эти объемы ни находились. Была подсчитана также средняя плотность светящегося вещества в таких объемах, и она оказалась одинаковой (с точностью до неизбежных ошибок измерений). Это означает, что Вселенная как целое действительно однородна по распределению в ней вещества, – что и принималось у Фридмана в качестве исходной гипотезы. Как мы уже сказали, это однородность не идеальная, а статистическая, однородность в среднем по большим масштабам – это масштабы порядка 1 Гпк и более. Объем с поперечным размером в один гигапарсек часто называют ячейкой однородности в наблюдаемой Вселенной.

Вселенная, рассматриваемая как единое целое, – самый крупный по пространственному размеру объект науки. Физические свойства Вселенной не сводятся просто к сумме свойств населяющих ее астрономических тел и систем. Главное из этих свойств – общее космологическое расширение. Глобальные свойства мира описываются стандартной космологической моделью. Область применимости модели – самые большие пространственные масштабы, превышающие размер космической ячейки однородности.

Расстояния, скорости, ускорение

Движение галактик изучают в астрономии с 1912–1915 гг., когда американский астроном Весто Слайфер приступил к выполнению обширной наблюдательной программы, целью которой было измерение скоростей близких туманностей, как тогда называли галактики. Он обнаружил, что галактики не стоят на месте, а движутся в пространстве, причем большинство из них удаляются от нас. Этот вывод вытекал из наблюдаемых спектров галактик: их движение обнаруживало себя в сдвиге спектральных линий света к красному концу спектра. Сдвиг спектральных линий в красную сторону возникает всегда, когда расстояние между источником и приемником света возрастает со временем, – таков эффект Доплера, хорошо уже изученный к тому времени. Количественной мерой красного смещения служит относительное увеличение длины волны, т. е. разность зарегистрированной и исходной («лабораторной») длины волны, деленной на исходную длину волны. Эту величину называют просто красным смещением, как и само явление. Это одна из основных наблюдаемых физических величин в космологии.

Космическое красное смещение имеет, как впоследствии оказалось, всеобщий характер: оно наблюдается для всех галактик во Вселенной. Исключения составляют только самые близкие к нам звездные системы; таковы знаменитая туманность

Андромеды и несколько других (менее крупных) галактик, находящихся от нас на расстояниях, не превышающих примерно 1 мегапарсек (Мпк). Но если расстояние больше, чем 1 Мпк, все находящиеся за этой границей галактики «разбегаются в пространстве», как говорил об этом Слайфер.

В 1927 г. бельгийский математик Жорж Лемэтр, повторив вычисления Фридмана, вывел из них в явном виде упомянутый выше линейный закон космологического расширения: $V=HR$. Более того, он привлек данные Слайфера о скоростях примерно трех десятков галактик и собрал опубликованные к тому времени в астрономической литературе сведения о расстояниях до них. Самые большие скорости достигали у него 15–18 тыс. километров в секунду (тогдашний рекорд наблюдаемых скоростей физических объектов), а расстояния не выходили за пределы трех мегапарсек. Лемэтр показал, что наблюдаемые скорости удаления галактик действительно пропорциональны (в среднем) наблюдаемым расстояниям. Он вычислил также и среднюю величину H – отношения скорости V к расстоянию R ; она составила у Лемэтра приблизительно 600 километров в секунду на мегапарсек (км/с/Мпк) в принятых в астрономии единицах. Через два года, в 1929 г., к этому результату пришел также и американский астроном Эдвин Хаббл. Он опирался по большей части на те же наблюдательные данные, что и Лемэтр, но отсеял несколько далеких галактик, данные о которых он считал, по-видимому, не слишком надежными. Самые большие скорости достигали у Хаббла 10 тысяч километров в секунду; самые малые расстояния составляли 0.1–0.2 Мпк, а самые большие – 2 Мпк.

Результаты Лемэтра и Хаббла получили подтверждение и развитие в наблюдательных работах 1930-х гг. С тех пор закон разбегания галактик $V=HR$ называют законом Хаббла, а величину H называют постоянной Хаббла. (Справедливости ради и самому закону, и входящей в него постоянной следовало бы вообще-то приписать оба упомянутых выше имени).

Через 30 лет после Хаббла его ученик и некогда сотрудник Аллан Сэндидж выяснил, что расстояния до галактик на самом деле в раз в восемь-десять больше, чем думали Лемэтр и Хаббл. Это была систематическая ошибка, т. е. она почти одинакова для всех галактик; в результате с ее исправлением закон Хаббла не был отменен, а остался полностью в силе. При этом предельные расстояния, на которых этот закон был экспериментально установлен, возросли до 16–20 Мпк. Что же касается постоянной Хаббла, то после поправки Сэндиджа ее значение составило 60–75 км/с/Мпк; это очень близко к значениям, которые найдены для тех же расстояний в настоящее время. Подводя в 2006 г. итог 15-летней программы наблюдений с помощью космического телескопа «Хаббл», Сэндидж и его соавторы дали для постоянной Хаббла величину 62 км/с/Мпк (с ошибкой около 10 %) для огромного интервала расстояний от 2–3 до 200 Мпк. На всех этих расстояниях надежно прослеживается линейный закон разбегания.

Стоит обратить внимание на то, что расстояния у Слайфера, Лемэтра, Хаббла и Сэндиджа находятся в

пределах космической ячейки однородности. Причем самые короткие расстояния почти в тысячу раз меньше размера ячейки. Так что эти наблюдения имеют локальный характер – они не достигают глобальных масштабов, с которых, собственно, начинается космология. На локальные расстояния космологическая модель не распространяется. Но почему же тогда главное следствие модели – закон Хаббла, – да и само разбегание галактик мы видим там, где до глобальных масштабов еще очень далеко? Этот вопрос был поставлен Сэндиджем в 1972 г., а ответ на него появился в 2000 г. после (и вследствие) открытия темной энергии; к этой теме мы ниже еще вернемся.

Когда во второй половине 1990-х гг. космический телескоп «Хаббл» и другие крупнейшие астрономические инструменты позволили выйти наконец на истинно космологические, глобальные расстояния в расширяющемся мире, космологическая теория однородной расширяющейся Вселенной получила прямое наблюдательное подтверждение. Подтвердилась, как мы уже сказали, сама идея однородности Вселенной как целого. Подтвердился и закон космологического расширения, вытекающий из теории Фридмана. При этом проверялся не закон прямой пропорциональности скорости и расстояния (закон Хаббла), а более сложное по своей структуре соотношение между скоростью (вернее, красным смещением) и расстоянием, вытекающее из точной теории космологического расширения. В пределах относительно малых расстояний это соотношение переходит в первом приближении в закон Хаббла. А в следующем приближении в соотношении между расстоянием и скоростью явным образом входит ускорение. Так что, измерив с должной точностью скорости и расстояния, можно по этому соотношению определить и величину ускорения, которое испытывают галактики при своем движении.

Это и было сделано нынешними нобелевскими лауреатами и их коллегами. В 1998–1999 гг. они сообщили, что им удалось измерить не только скорости удаляющихся галактик и расстояния до них, но и – впервые в космологии – ускорение, которое испытывают галактики при своем движении. Предметом наблюдения были далекие вспышки сверхновых звезд. Из-за их исключительной яркости сверхновые можно наблюдать на очень больших, по-настоящему космологических расстояниях. Опуская другие детали, скажем, что наблюдались сверхновые определенного типа (Ia), которые принято считать «стандартными свечами». Дело в том, что их собственная светимость в максимуме блеска может быть довольно точно восстановлена по виду их кривой блеска, т. е. зависимости регистрируемой светимости от времени (эксперты по сверхновым все еще продолжают спорить о том, насколько точна такая процедура). На эту замечательную особенность сверхновых звезд данного типа обратил внимание много лет назад профессор ГАИШ МГУ Ю.П. Псковский. Определяя расстояния до этих звезд (и тем самым до галактик, где эти звезды вспыхивают), астрономы находят так называемое яркостное расстояние, которое и входит в упомянутое выше космологическое обобщение закона Хаббла.

Первая группа наблюдателей, сообщившая о своих результатах в 1998 г., располагала данными о всего двух десятках сверхновых нужного типа на нужных расстояниях; но уже и этого было достаточно, чтобы заметить, что убывание видимой яркости с расстоянием происходит в среднем быстрее, чем это ожидалось по космологической теории с отрицательным ускорением, которая тогда считалась стандартной. Но это означало, что космологическое расширение происходит с положительным ускорением. Космическое ускорение направлено в ту же сторону, что и скорости движения галактик, и оно заставляет галактики удаляться от нас все быстрее и быстрее.

По измеренной величине космического ускорения астрономы смогли определить эйнштейновскую космологическую постоянную, а с ней и плотность темной энергии, которая задается значением этой постоянной. По данным на середину 2011 г. плотность темной энергии составляет $0.7 \cdot 10^{-29}$ г/см³ (с точностью не хуже 10 %). Антигравитирующая среда со столь ничтожной по земным понятиям плотностью управляет космологическим расширением – самым грандиозным по пространственно-временному масштабу явлением природы.

В комбинации с другими космологическими сведениями этот результат позволяет установить также, что в наблюдаемой Вселенной на темную энергию приходится не меньше 70 % всей массы/энергии мира. Из остальных 30 % чуть больше 25 % принадлежит темной материи и менее 5 % – «обычному» веществу из протонов, нейтронов и электронов (это вещество называют барионным). При таком балансе космических энергий всемирное антигравитение, создаваемое темной энергией, действительно сильнее тяготения, создаваемого темной материей и барионами.

Темная энергия как вакуум

В современной стандартной космологической модели темная энергия понимается как особая космическая среда, которая равномерно заполняет все пространство мира, причем ее плотность всюду одинакова и постоянна во времени (в любой системе отсчета). Такая макроскопическая интерпретация восходит к Лемэтру, к его работам 1930–1940-х гг.; в 1965 г. ее детально разработал Э.Б. Глинер, теоретик Физико-технического института в Петербурге (тогда Ленинграде). Темная энергия – весьма необычная среда. Начать с того, что ее плотность положительна, а давление отрицательно. Отрицательное давление не часто, но все же встречается в физике. При нормальных условиях давление в нормальной жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды у винта парохода) и в твердых телах (например, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление тоже может возникать. Это требует некоторых специальных условий, но само по себе не является чем-то исключительным. Однако в случае темной энергии ситуация совсем особая. Ее давление не только отрицательно, но к тому же равно по абсолютной величине плотности энергии (эти две физические величины имеют одинаковую размер-

ность). Такое невозможно ни в каких жидкостях, газах или твердых телах.

Как заметил Глинер, столь необычная связь между давлением и плотностью среды возможна только в том случае, если эта среда есть вакуум. Простейший и тривиальный пример вакуума – это абсолютная пустота, когда в пространстве нет ни частиц, ни полей, ни энергии. Таков вакуум классической механики. Главное механическое свойство вакуума состоит в том, что движение и покой относительно него неразличимы, так что он не может служить системой отсчета. Глинер показал, что тем же механическим свойством обладает и среда, описываемая эйнштейновской космологической постоянной. Темная энергия – это «непустой» вакуум.

О «непустом» вакууме говорили еще с конца 1920-х гг., когда возникла квантовая механика. Из ее положений вытекает, в частности, что у всех полей и частиц природы имеется состояние минимальной энергии, которое и называется физическим вакуумом. В этом состоянии отсутствуют реальные частицы, но энергия тем не менее не равна нулю вследствие неустранимых «нулевых» колебаний физических полей. В квантовой физике такой непустой вакуум хорошо изучен как теоретически, так и экспериментально. Он действительно может обладать определенной собственной энергией, а также и давлением, если описывать его на языке макроскопической теории. Причем, как было продемонстрировано Я.Б. Зельдовичем, А.А. Старобинским и другими теоретиками, давление и плотность энергии квантового вакуума связаны между собой именно тем соотношением, которое было найдено ранее Глинером для космического вакуума.

На основании этого многие полагают, что открытая астрономами космическая темная энергия есть квантовый вакуум всех полей и частиц. В таком случае темная энергия складывается из «нулевых» квантовых колебаний. Это очень естественное и исключительно привлекательное предположение; остается лишь доказать его на деле: вычислить значение плотности темной энергии и сравнить результат с астрономическими данными. Такое вычисление делается очень просто, но результат, увы, отличается от наблюдаемой величины на 120 порядков. Вместо наблюдаемой ничтожной плотности, которая меньше плотности воды на 29 порядков, теоретики получают плотность, которая на 90 с лишним порядков больше плотности воды. Эту чудовищную величину называют планковской плотностью; она выражается в виде комбинации трех фундаментальных физических констант – постоянной Планка (которая представляет в этом выражении квантовые эффекты), гравитационной постоянной (тяготение) и скорости света (релятивизм).

Как заметил Стивен Вайнберг, классик фундаментальной физики и нобелевский лауреат, это самый грубый просчет теоретической физики за все время ее существования, считая от Ньютона. То, что кажется естественным и привлекательным в современной физике, на самом деле оказывается полнейшей нелепостью. Многие считают, что эти 10^{120} есть точная количественная мера нашего теорфизического невежества.

Вернемся к астрономии. Макроскопическое описание темной энергии как вакуумно-подобной среды полностью согласуется с данными наблюдений. По сведениям на сегодняшний день, отношение давления темной энергии к ее плотности есть минус единица с точностью до 5 %. С такой (очень высокой для космологии) точностью наблюдения подтверждают интерпретацию темной энергии в духе эйнштейновской космологической постоянной. Похоже, что иные, более сложные и, в общем, произвольные варианты интерпретации темной энергии постепенно вытесняются наблюдениями, точность которых от года к году возрастает.

Почему же вакуумно-подобная среда создает не тяготение, а антитяготение? Согласно общей теории относительности, тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением. Так что «эффективная» плотность, создающая тяготение, складывается из двух слагаемых: одно из них – плотность энергии, а другое – три величины давления. При той связи между давлением и плотностью, о которой мы сказали выше, эффективная гравитирующая плотность оказывается отрицательной – это две величины давления. Отсюда и антитяготение темной энергии: отрицательная эффективная плотность создает «отрицательное» тяготение.

Для иллюстрации приведем один численный пример. Пусть в мире есть только темная энергия и больше ничего. Поместим в нее два нейтральных атома водорода. Они будут притягиваться друг к другу по закону Ньютона и отталкиваться друг от друга по закону Эйнштейна. Антитяготение будет сильнее тяготения, если расстояние между атомами больше чем полметра.

Локальный тест

Если темная энергия действительно описывается эйнштейновской космологической постоянной и, следовательно, имеет всюду одинаковую плотность, то она присутствует не только на глобальных космологических расстояниях, но и вообще везде в мире, в любом кубическом сантиметре пространства. Можно ли это утверждение проверить в лабораторном эксперименте или в локальных астрономических наблюдениях? Такая проверка была бы прямым – и притом независимым от космологии – тестом для эйнштейновской идеи всемирного антитяготения.

Что касается лабораторного эксперимента, он невозможен ни сейчас, ни даже в будущем: эффект темной энергии слишком слаб в земных условиях. Он неизмеримо слаб и в масштабе Солнечной системы. Действительно, движение планет и других объектов (как естественных, так и искусственных) измеряется сейчас с точностью, которая учитывает эффекты общей теории относительности, – это реально требуется и для космической навигации, и для дорожных навигаторов типа GPS. Но в Солнечной системе эффекты темной энергии порядков на 20 слабее релятивистских эффектов.

Оказывается, нужно отступить от Солнечной системы на несколько мегапарсек, и там мы найдем подаренные нам самой природой отличные измерительные установки для изучения темной энергии.

Ими могут служить группы и скопления галактик. В 2000 г. в ГАИШ МГУ было показано, что в Местной группе галактик и вокруг нее эффекты антитяготения могут быть весьма сильными. Более того, антитяготение должно быть сильнее тяготения на расстоянии в 1–1.5 Мпк и более от центра группы. Это отнюдь не космологические масштабы, расстояния здесь в тысячу раз меньше размера космической ячейки однородности.

Местную группу галактик образуют наша Галактика Млечный Путь, другая гигантская галактика Туманность Андромеды и еще полсотни более мелких карликовых галактик. Это гравитационно-связанная система, находящаяся в квазистационарном состоянии под действием взаимного притяжения всех ее тел. Эти тела заполняют почти сферический объем с радиусом около 1 Мпк, а их полная масса составляет примерно 10^{12} масс Солнца. Замечательно, что вне группы на расстояниях от 1 до 3 Мпк наблюдается два десятка карликовых галактик, которые – все! – удаляются от центра группы. Скорость удаления тем больше, чем дальше карлик от группы. Недавние наблюдения И.Д. Караченцева (САО РАН) и его коллег с помощью космического телескопа «Хаббл» показали, что в этом потоке разбегания неплохо выполняется закон Хаббла $V=HR$, а постоянная $H=60-70$ км/с/Мпк, что весьма близко к величине глобальной космологической постоянной Хаббла.

Этот поток разбегающихся галактик-карликов представляет собой, можно сказать, расширяющуюся Вселенную в миниатюре. Он хорошо описывается теоретической моделью, разработанной в ГАИШ МГУ совместно с астрономами Финляндии и США. Считается, что группа и поток разбегания погружены в однородный «океан» темной энергии. При этом тяготение сильнее антитяготения внутри группы, а вне группы антитяготение темной энергии сильнее притяжения к группе. Вспомним приведенный выше иллюстративный пример: там были два атома на фоне темной энергии, а в нашей модели – группа и убегающие от нее галактики-карлики. Антитяготение, действующее на карлик, сильнее притяжения к группе, если расстояние до нее больше чем 1–1.5 Мпк. Антитяготение доминирует в локальном потоке разбегания точно так же, как и во Вселенной как целом. В обоих случаях разбегание галактик происходит с ускорением, а темп разбегания (т. е. постоянная Хаббла) определяется в основном величиной плотности темной энергии. Локальный темп разбегания H близок к глобальному, если плотность темной энергии всюду одинакова. Раз наблюдения дают в обоих случаях – глобальном и локальном – одну и ту же (практически) величину H , то отсюда следует, что локальная и глобальная плотности совпадают.

Наши исследования показали, что теми же свойствами обладают и наблюдаемые потоки разбегания вокруг двух других групп и еще двух скоплений галактик на расстояниях от 3 до 30 Мпк. Наш результат: темная энергия действительно присутствует в локальных масштабах, а ее плотность в этих масштабах совпадает (в пределах ошибки измерений) с величиной, найденной на глобальных масштабах.

Такой подход к локальной динамике Вселенной легко распространяется на всю область масштабов внутри ячейки однородности – от 1–3 до 200 Мпк (см. выше). Здесь важнее всего то обстоятельство, что темная энергия заполняет идеально равномерно все космическое пространство. По этой причине Вселенная оказывается куда более однородной, чем об этом можно было судить ранее только по распределению галактик. Действительно, внутри ячейки однородности существует мировой океан темной энергии, над гладкой поверхностью которого тут и там выступают отдельные редкие «пики донного рельефа» – сгущения темной материи и барионов, образующие группы и скопления галактик. На пики приходится сравнительно небольшая доля объема ячейки однородности. По этой причине мир почти везде однороден, так что разбегание галактик должно почти везде происходить по закону Хаббла, и никак иначе. При этом постоянная Хаббла должна почти целиком определяться величиной плотности темной энергии. Таково предлагаемое нами разъяснение парадокса, на который много лет назад обратил внимание Сэндидж. В 2006 г., комментируя наши работы, Сэндидж заметил: у идеи «космического вакуума нет сейчас жизнеспособной альтернативы».

Локальные потоки галактик – и потоки вокруг близких систем, и движения, открытые и изученные на заре космологии Слайфером, Лемэтром и Хабблом, – оказываются феноменом космологической природы, так как их динамикой управляет в основном вездесущая темная энергия. Закон Хаббла, найденный Лемэтром и Хабблом, был в этом смысле первым эмпирическим указанием на присутствие в мире темной энергии. По сути, они открыли не расширение Вселенной, а эйнштейновское всемирное антитяготение и темную энергию.

Подведем итог: Эйнштейн в очередной раз оказался прав. Предсказанное им всемирное антитяготение обнаружено в астрономических наблюдениях. Оно доминирует и во Вселенной как целом, и в локальных движениях галактик. Но какова физическая природа антитяготения? Из чего «сделана» темная энергия? Почему ее так много в наблюдаемом мире? Ответа нет. Это задача, заданная Эйнштейном фундаментальной физике 21-го века.

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва