

Темная энергия во Вселенной

В.А.Рубаков

Физики любят красное словцо. В их среде с некоторых пор принято давать "ненаучные" названия вновь открытым сущностям. Взять хотя бы странный и очарованный кварки. Вот и темная энергия — не синоним темных сил, а термин, придуманный для обозначения некоторых необычных свойств нашей Вселенной.

Открытие темной энергии было сделано астрономическими методами и стало для большинства физиков полной неожиданностью. Темная энергия — пожалуй, главная загадка современного естествознания. Вполне вероятно, что ее разгадка станет важнейшим событием физики XXI века, сравнимым по масштабу с крупнейшими открытиями недалекого прошлого, такими как открытие феномена расширения Вселенной. Не исключено даже, что произойдет настолько радикальное развитие теории, что оно встанет в один ряд с созданием общей теории относительности, открытием кривизны пространства-времени и связи этой кривизны с гравитационными силами. Мы сейчас находимся в начале пути, и разговор о темной энергии — это возможность заглянуть в "лабораторию" физиков в то время, когда их работа идет полным ходом.

1 Немного истории

1.1 "Маловато будет"

То, что в нашей Вселенной "что-то не так", стало ясно космологам уже к началу 90-х годов. Чтобы пояснить, о чем идет речь, начнем с того, что напомним о расширении нашей Вселенной. Все галактики разбегаются друг от друга и наблюдателю в каждой из кажется, что именно в ней центр расширения; чем дальше галактика, тем быстрее она удаляется от центра расширения (рис. 1). Обнаружено это было наблюдениями с Земли в 20-ых годах XX века. Количественно темп расширения характеризуется параметром Хаббла. К началу 90-х годов значение параметра Хаббла в современной Вселенной было довольно хорошо измерено: темп расширения Вселенной сегодня таков, что галактики, удаленные от Земли на расстояние 1 миллиард световых лет, убегают от нас со скоростью 24 000 километров в секунду.

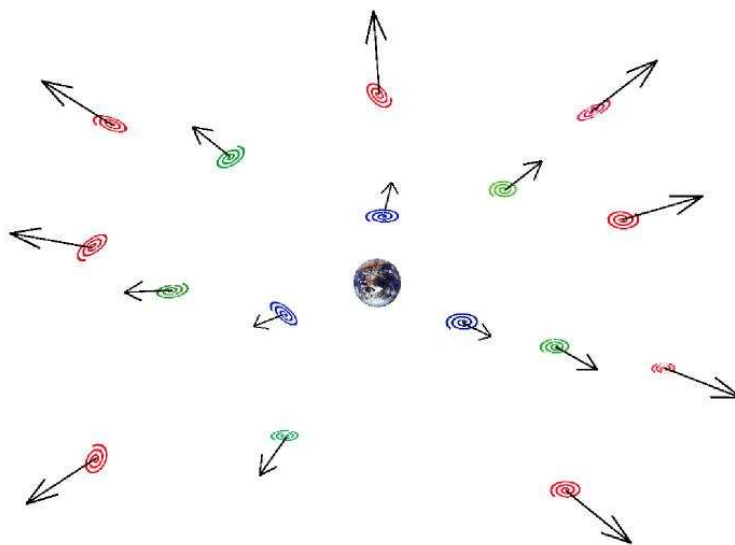


Рис. 1: Расширяющаяся Вселенная. Более далекие галактики удаляются от нас быстрее и выглядят более красными из-за эффекта Доплера. Измерения расстояний до удаленных галактик совместно с измерениями их скоростей позволяют определить значение параметра Хаббла, характеризующего темп расширения Вселенной.

Отметим, что параметр Хаббла зависит от времени; так в далеком прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее, чем сейчас, и, соответственно, параметр Хаббла был гораздо больше.

В современной теории гравитации — общей теории относительности — параметр Хаббла однозначно связан с двумя другими характеристиками Вселенной: во первых, с суммарной плотностью энергии всех форм материи, вакуума и т.д., во-вторых, с кривизной *трехмерного пространства*. Наше трехмерное пространство, вообще говоря, не обязано быть евклидовым; его геометрия может, например, быть аналогична геометрии сферы; сумма углов треугольника может не равняться 180 градусам. В таком случае "упругость" пространства с точки зрения расширения Вселенной играет ту же роль, что и плотность энергии. Итак, в рамках общей теории относительности измерение параметра Хаббла определяет значение суммы полной плотности энергии во Вселенной и вклада, связанного с возможной неевклидовостью трехмерного пространства.

К началу 90-х годов с неплохой точностью была оценена и плотность энергии "нормальной" материи в современной Вселенной. "Нормальная" она в том смысле, что испытывает такие же гравитационные взаимодействия, что и обычное вещество. Так, для "нормальной" материи справедлив закон Ньютона. Дело, впрочем, осложнилось тем, что большая часть "нормальной" материи — это отнюдь не известное нам вещество (атомы и ионы), а так называемая *темная материя*. Темная материя, по-видимому, состоит из новых, не открытых пока в земных экспериментах элементарных частиц. В отличие от многих известных частиц они не несут электрического заряда, а потому не излучают свет; состоящая из них материя действительно темная. Сходство с обычным веществом состоит в том, что силы гравитационного притяжения заставляют темную материю собираться в сгустки — галактики и скопления галактик (рис. 2). Она и сама притягивает вещество и свет; именно по этому эффекту гравитационного притяжения она и была обнаружена. Более того, измерения гравитационных сил в скоплениях галактик позволили определить массу темной материи в этих скоплениях, а в конечном итоге в целом во Вселенной. Таким образом и была найдена полная плотность энергии "нормальной" материи (для нее справедлива знаменитая формула $E = mc^2$).

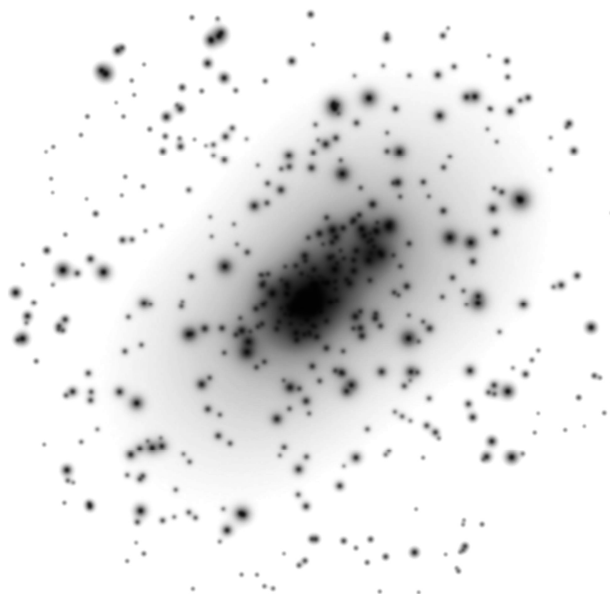


Рис. 2: Распределение массы в скоплении галактик. Черные пятна — галактики. Масса же сосредоточена в основном в темной материи, распределенной по скоплению более равномерно.

И что же оказалось? Выяснилось, что "нормальной" материи явно не хватает для объяснения измеренного темпа расширения Вселенной. Причем сильно: "недостача" составляла около $2/3$ (по современным оценкам около 72%). Возможных объяснений этому факту было два: либо трехмерное пространство искривлено, и недостающий вклад в параметр Хаббла связан с его "упругостью", либо во Вселенной присутствует новая форма энергии, которую впоследствии и стали называть темной энергией.

1.2 Куда ни кинь...

С теоретической точки зрения обе эти возможности — и неевклидовость пространства, и темная энергия — выглядели крайне неправдоподобными. Если бы не упрямые факты, так же бы обстояло дело и сейчас.

Начнем с кривизны трехмерного пространства. В процессе расширения Вселенной пространство разглаживается, его кривизна уменьшается. Если кривизна отличается от нуля сейчас, то в прошлом она была больше, чем сегодня. Однако плотность энергии (массы) материи убывает при расширении Вселенной *еще быстрее*. Это означает, что в прошлом *относительный* вклад кривизны в параметр Хаббла был очень мал, а главным, с большим запасом, был вклад материи. Для того, чтобы сегодня расширение Вселенной на $2/3$ обеспечивалось кривизной, необходимо "подогнать" значение радиуса кривизны пространства в прошлом с фантастической точностью — через 1 секунду после Большого взрыва он должен был быть равен одной миллиардной доле от тогдашнего размера наблюдаемой Вселенной, не больше и не меньше! Без такой подгонки кривизна сегодня была бы либо на много порядков больше, либо на много порядков меньше, чем необходимо для объяснения наблюдений.

Даже если отвлечься от гипотезы о том, что недостающий вклад в современный параметр Хаббла обеспечивается именно кривизной пространства, проблема кривизны все равно остается: в любом случае необходимо, чтобы кривизна была чрезвычайно мала на ранних стадиях, иначе она была бы слишком велика сегодня. Эта проблема была одним из главных соображений, приведших к представлению об инфляционной стадии эволюции Вселенной. Согласно инфляционной теории, предложенной А. Старобинским и независимо А. Гутом и сформировавшейся благодаря работам А. Линде, А. Албрехта и П. Стейнхардта, Вселенная на самом раннем этапе своей эволюции прошла через стадию чрезвычайно быстрого, экспоненциального расширения (раздувания, инфляции). По окончании этой стадии Вселенная разогрелась до очень высокой температуры, и наступила эпоха горячего Большого взрыва.

Хотя инфляционная стадия длилась, скорее всего, малую долю секунды, за это время Вселенная растянулась настолько, что ее размер стал гораздо больше размера той части, которую мы видим сегодня. Для нас важно, что в результате инфляционного растяжения пространства его радиус кривизны упал практически до нулевого значения. Таким образом, инфляционная теория приводит к предсказанию о том, что пространство современной Вселенной с высочайшей степенью точности евклидово. Это, конечно, идет вразрез с гипотезой о том, что Вселенная расширяется сегодня на $2/3$ благодаря кривизне.

С темной энергией дело обстоит аналогичным образом, только еще хуже. Мы будем обсуждать различные гипотезы о природе темной энергии ниже, а здесь ограничимся следующим замечанием. Независимо от того, что представляет собой темная энергия, ее плотность может быть охарактеризована единственным параметром размерности энергии. Для соответствия наблюдательным данным значение этого параметра — энергетического масштаба темной энергии — должно быть примерно равно 0.002 электронвольт. В то же время, известные фундаментальные взаимодействия — сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное — характеризуются своими энергетическими

масштабами. Наименьший из них относится к сильным (ядерным) взаимодействиям и составляет около 200 миллионов электронвольт. Получается нестыковка в 100 миллиардов раз! Хуже всего, что этой нестыковке, и вообще чрезвычайно малой величине темной энергии, очень трудно найти объяснение; например, инфляционная теория, так хорошо справляющаяся с проблемой кривизны, в этом вопросе совершенно ни при чем.

Из-за трудностей с интерпретацией темной энергии более популярной в течение довольно долгого времени была та точка зрения, что за современный темп расширения Вселенной ответственна все же пространственная кривизна. Многие (хотя и далеко не все) физики никак не могли воспринять всерьез возможность того, что темная энергия действительно существует, и считали пространственную кривизну "меньшим из зол". Вопрос, как обычно, был решен экспериментом.

1.3 Вселенная расширяется с ускорением

Перелом наступил в 1998 - 1999 годах, когда две группы из США, одна под руководством А. Райсса и Б. Шмидта, а другая - С. Перлмуттера, сообщили о результатах наблюдений удаленных сверхновых типа Ia. Из этих наблюдений следовало, что наша Вселенная расширяется с *ускорением*. Такое свойство вполне согласуется с представлением о темной энергии, в то время как неевклидовость пространства к ускоренному расширению не приводит. Тем самым был сделан однозначный выбор в пользу темной энергии, а гипотеза о неевклидовом трехмерном пространстве была отвергнута (мы еще ненадолго вернемся к ней).

Несколько слов о сверхновых типа Ia. Это — термоядерные взрывы, которыми заканчивается жизнь некоторых типов звезд. Детальное теоретическое описание этих взрывов до сих пор отсутствует, но на основании наблюдений ближних сверхновых были установлены эмпирические закономерности, позволяющие установить их абсолютную светимость, то есть определить энергию, которую они излучают в процессе довольно короткой вспышки. Иными словами, сверхновые типа Ia представляют собой "стандартные свечи": зная абсолютную светимость и измеряя видимую яркость (поток энергии, приходящий на Землю), можно определить расстояние до каждой из них — чем больше расстояние, тем меньше видимая яркость. Одновременно можно установить и скорость удаления от нас каждой из сверхновых (используя эффект Допплера). Сверхновые — очень яркие объекты, их видно на огромных расстояниях. Иначе говоря, удаленные сверхновые, которые мы наблюдаем сейчас, взорвались давным-давно, и поэтому скорость их убегания определялась темпом расширения Вселенной *тогда*, в далеком прошлом. Тем самым наблюдения сверхновых типа Ia позволяют опеределить темп расширения на сравнительно ранних этапах эволюции Вселенной (7 миллиардов лет назад и даже несколько раньше) и проследить зависимость этого темпа от времени. Именно это и дало возможность установить, что Вселенная расширяется с ускорением.

1.4 Пространство — евклидово

Окончательное доказательство того, что неевклидовость трехмерного пространства, если она и есть, не играет сколько-нибудь существенной роли в расширении Вселенной, было получено путем измерения свойств реликтового излучения. Реликтовое излучение, пронизывающее сегодня нашу Вселенную, было испущено на довольно ранней стадии космологической эволюции. Дело в том, что Вселенная в прошлом была гораздо более плотной и горячей, чем сейчас. В процессе расширения она стала более разреженной и остыла; современная температура реликтового излучения составляет 2.725 градусов Кельвина.

На ранних стадиях вещество в горячей Вселенной было в состоянии плазмы — протоны сами по себе, электроны сами по себе. Такая среда непрозрачна для электромагнитного излучения, фотоны все время рассеиваются, поглощаются, излучаются элек-

тронами. Когда Вселенная остыла примерно до 3000 градусов, электроны и протоны довольно быстро объединились в атомы водорода, и вещество стало прозрачным для фотонов (рис. 3). Эпоха перехода вещества из плазменного в газообразное состояние и является плохой последнего излучения реликтовых фотонов (точнее было бы говорить о последнем рассеянии, но для нас эта тонкость несущественна). В это время возраст Вселенной составлял 300 тысяч лет (современный возраст — 13,7 миллиардов лет). С тех пор фотоны распространяются по Вселенной свободно, их длина волны увеличивается из-за растяжения пространства, и сегодня эти реликтовые фотоны представляют из себя радиоволны.

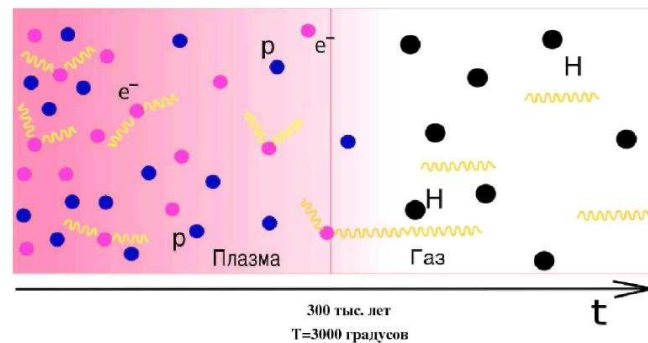


Рис. 3: При температуре около 3000 градусов вещество во Вселенной перешло из плазменного в газообразное состояние и стало прозрачным для фотонов. По горизонтальной оси отложено время. Желтым цветом схематически изображены фотоны.

В эпоху излучения реликтовых фотонов Вселенная не была в точности однородной. Имевшиеся тогда неоднородности были зародышами структур — первых звезд, галактик, скоплений галактик. В то время неоднородности плазмы, как обычно для плотных сред, представляли собой звуковые волны. Важно, что в ту эпоху во Вселенной имелся характерный масштаб расстояний, который проявляется сейчас в свойствах излученных тогда реликтовых фотонов. Звуковые волны с большой длиной и, соответственно, малым периодом, еще не успели развиться к эпохе излучения реликтовых фотонов, а волны с "правильной" длиной как раз успели попасть в фазу максимального сжатия. Эта "правильная" длина волны представляет собой "стандартную линейку" эпохи излучения реликтовых фотонов; ее размер надежно вычисляется в теории горячего Большого взрыва.

Неоднородность Вселенной эпохи последнего излучения реликтовых фотонов проявляется в том, что фотоны, излученные в разных местах, имеют немного разную температуру. Иными словами, температура фотонов зависит от направления на небесной сфере, с которого они к нам приходят. Эффект слабый: относительная разница температур в разных направлениях составляет около 1/100 000. Тем не менее, этот эффект был надежно измерен. Более того, на рубеже XX - XXI веков в экспериментах BOOMERANG и МАХИМА впервые был измерен угол, под которым видна обсуждавшаяся только что "стандартная линейка". Ясно, что этот угол зависит от геометрии пространства: если сумма углов треугольника превышает 180 градусов, то и этот угол больше. В результате было выяснено, что наше трехмерное пространство с хорошей степенью точности евклидово. Последующие измерения подтвердили этот вывод. С точки зрения расширения Вселенной существующие результаты означают, что кривизна пространства вносит пренебрежимо малый вклад (менее 1%) в параметр Хаббла. Темп расширения Вселенной на 70% обусловлен сегодня именно темной энергией.

2 Больше не знают о ней ничего

Какие же свойства темной энергии известны сегодня? Таких свойств немного, всего три. Но то, что известно, может по справедливости вызвать изумление.

Первое — это тот факт, что в отличие от "нормальной" материи темная энергия не скучивается, не собирается в объекты типа галактик или их скоплений. Насколько сейчас известно, темная энергия "разлита" по Вселенной равномерно. Это утверждение, как и любое, основанное на наблюдениях или экспериментах, справедливо с определенной точностью. Нельзя полностью исключить того, что где-то во Вселенной плотность темной энергии немного больше, а где-то немного меньше средней плотности, где-то темная энергия чуть-чуть более густая, а где-то чуть-чуть более разреженная. Однако из наблюдений следует, что такие отклонения от однородности, если они и есть, должны быть весьма малы по величине.

О втором свойстве мы уже говорили: темная энергия заставляет Вселенную расширяться с ускорением. Этим темная энергия тоже разительно отличается от нормальной материи. Для нормальной материи справедливо обычное представление о том, как "работают" гравитационные силы: частички вещества, образовавшиеся, скажем, в результате взрыва и разлетающиеся от центра, постепенно замедляют свой разлет из-за гравитационного притяжения к центру. Если бы не темная энергия, то так же обстояло бы дело и со Вселенной: скорость разбегания галактик уменьшалась бы с течением времени. Темная энергия приводит к обратному эффекту, галактики разбегаются все быстрее и быстрее.

Два описанных свойства говорят о том, что темная энергия в определенном смысле испытывает антигравитацию, для нее имеется гравитационное отталкивание вместо гравитационного притяжения. Из-за этого расширение Вселенной ускоряется, из-за этого же темная энергия распределена в пространстве равномерно. Области с повышенной плотностью *нормальной* материи за счет гравитационного притяжения собирают вещество из окружающего пространства, сами эти области сжимаются и образуют плотные сгустки; именно так сформировались первые звезды, а потом галактики и скопления галактик. Для антигравитирующей субстанции все наоборот: области с повышенной плотностью (если они есть) растягиваются из-за гравитационного отталкивания, неоднородности разглаживаются, и никаких сгустков не образуется.

Третье свойство темной энергии состоит в том, что ее плотность не зависит от времени. Тоже удивительно: Вселенная расширяется, объем растет, а плотность энергии остается постоянной. Кажется, что здесь есть противоречие с законом сохранения энергии. За последние 8 миллиардов лет Вселенная расширилась вдвое. Область пространства, которая тогда имела, скажем, размер 1 метр, сегодня имеет размер 2 метра, ее объем увеличился в 8 раз, во столько же раз увеличилась энергия в этом объеме. Несохранение энергии налицо. Разумеется, это относится именно к темной энергии: количество частиц нормальной материи в расширяющемся объеме не изменилось, их полная энергия покоя тоже, а плотность энергии покоя упала в 8 раз.

На самом деле рост энергии при расширении Вселенной не противоречит законам физики. Темная энергия устроена так, что расширяющееся пространство совершает над ней работу, что и приводит к увеличению энергии этой субстанции в расширяющемся объеме пространства. Правда, расширение пространства само обусловлено темной энергией, так что ситуация напоминает барона Мюнхгаузена, вытаскивающего себя за волосы из болота. И тем не менее противоречия нет: в космологическом контексте невозможно ввести понятие *полной* энергии, включающей в себя энергию самого гравитационного поля. Так что и закона сохранения энергии, запрещающего рост или убывание энергии какой-нибудь формы материи, тоже нет. [Заметим в скобках, что энергия газа

реликтовых фотонов в расширяющемся объеме тоже не сохраняется. Количество фотонов в нем не меняется со временем, но длина волны увеличивается из-за растяжения пространства. Фотоны краснеют, энергия каждого из них убывает, уменьшается и суммарная энергия всех фотонов.]

Утверждение о постоянстве плотности темной энергии тоже основано на астрономических наблюдениях, а потому тоже справедливо с определенной точностью. Чтобы охарактеризовать эту точность, скажем, что за последние 8 миллиардов лет плотность темной энергии изменилась не более чем в 1,4 раза, так что энергия в расширяющемся объеме увеличилась в $6 - 11$ раз. Это мы сегодня можем сказать с уверенностью.

Отметим, что второе и третье свойство темной энергии — способность приводить к ускоренному расширению Вселенной и ее постоянство во времени (или, более общо, очень медленная зависимость от времени) — на самом деле тесно связаны между собой. Такая связь следует из уравнений общей теории относительности. В рамках этой теории ускоренное расширение Вселенной происходит именно тогда, когда плотность энергии в ней или совсем не меняется, или меняется весьма медленно. Таким образом, антигравитация темной энергии и ее сложные отношения с законом сохранения энергии — две стороны одной медали.

Этим надежные сведения о темной энергии по-существу исчерпываются. Дальше начинается область гипотез. Прежде чем говорить о них, обсудим вкратце один общий вопрос.

3 Почему сейчас?

Если в современной Вселенной темная энергия дает наибольший вклад в полную плотность энергии, то в прошлом это было далеко не так. Скажем, 8 миллиардов лет назад нормальная материя была в 8 раз более плотной, а плотность темной энергии была такой же (или почти такой же) как сейчас. Отсюда несложно заключить, что тогда соотношение между энергией покоя нормальной материи и темной энергией было в пользу первой: темная энергия составляла около 15%, а не 72% как сегодня. Из-за того, что в то время главную роль играла нормальная материя, расширение Вселенной происходило с *замедлением*. Еще раньше влияние темной энергии на расширение было совсем слабым.

Замечательно, что такая картина подтверждается данными по сверхновым типа 1a. Наиболее удаленные из них взорвались более 8 миллиардов лет назад, и измерения их скоростей показывают, что расширение Вселенной тогда действительно замедлялось. Результаты других космологических наблюдений также говорят о том, что на ранних этапах эволюции Вселенной темная энергия была незначительна. Об одной серии таких результатов стоит упомянуть. В период от 1 секунды до нескольких минут после Большого взрыва, когда температура во Вселенной менялась от 10 миллиардов до сотен миллионов градусов, в космической плазме активно шли термоядерные реакции. В результате образовались дейтерий, изотопы гелия и лития. В некоторых местах во Вселенной этот первичный состав вещества практически не изменился, и его удалось измерить. С другой стороны, его можно надежно рассчитать, при этом результат, разумеется, зависит от темпа расширения Вселенной в ту далекую эпоху. Так вот, результаты расчета согласуются с наблюдениями, если считать, что темная энергия не играла тогда никакой роли. Точнее, вклад темной энергии (как и других новых, гипотетических форм энергии) в полную плотность энергии в период термоядерных реакций ограничен на уровне около 15%. Точность вроде бы не очень высока, но не надо забывать, что речь идет о первых секундах после Большого взрыва!

Итак, влияние темной энергии и вызванное им ускорение расширения Вселенной — явления по космологическим меркам совсем недавние: ускорение началось "всего" 6,5 миллиардов лет назад. С другой стороны, поскольку плотность нормальной материи убывает со временем, а плотность темной энергии — нет, темная энергия вскоре (опять-

таки по космологическим меркам) будет полностью доминировать. Значит, современный этап космологической эволюции — это переходный период, когда темная энергия уже играет заметную роль, но расширение Вселенной определяется не только ей, но и нормальной материей. Является ли эта выделенность нашего времени случайным совпадением или за ней стоит какое-то глубокое свойство нашей Вселенной? Этот вопрос — "почему сейчас?" — остается пока открытым.

4 Кандидаты

4.1 Энергия вакуума = космологическая постоянная

Если бы не было гравитации, абсолютное значение энергии не имело бы физического смысла. Во всех теориях, описывающих природу, за исключением теории гравитационных взаимодействий, смысл имеет лишь *разность* энергий тех или иных состояний. Так, говоря об энергии связи атома водорода, мы имеем в виду разность двух величин: суммарной энергии покоя свободных протона и электрона, с одной стороны, и энергии покоя атома с другой. Именно эта разность энергий выделяется (передается рожденному фотону), когда электрон и протон соединяются в атом. Точно так же под энергией покоя протона мы на самом деле понимаем разность энергий состояния, в котором имеется протон, и состояния без протона — вакуума. Если бы не гравитационное взаимодействие, говорить об энергии вакуума было бы бессмысленно, ее просто не с чем было бы сравнивать.

Дело обстоит совершенно иначе, если мы интересуемся именно гравитационными взаимодействиями. Энергия вакуума, как и любая другая энергия, "весит", гравитирует. Вакуум — это состояние с наименьшей энергией (поэтому, кстати, энергию от него отобрать нельзя), однако эта энергия совершенно не обязана быть равной нулю; с теоретической точки зрения она может быть как положительной, так и отрицательной. Можно ли ее вычислить "из первых принципов" — большой вопрос. Но в любом случае энергия вакуума, если она положительна, имеет как раз те свойства, которыми должна обладать темная энергия. Действительно, вакуум везде одинаков (по крайней мере в видимой части Вселенной). Предположение об обратном привело бы к противоречиям, например, с наблюдениями реликтового излучения: в разных вакуумах свойства космической плазмы в эпоху последнего излучения фотонов были бы сильно разными, сильно различались бы и температуры излученных фотонов. Имелись бы и другие непреодолимые противоречия с наблюдениями. Итак, вакуум везде одинаков. Одинакова и его плотность энергии. Вакуум не может быть где-то более "густым", а где-то более "разреженным", иначе это был бы не вакуум. Стало быть, как и требуется для темной энергии, энергия вакуума распределена равномерно по Вселенной.

Далее, при сравнительно медленном расширении Вселенной (а именно так обстоит дело сейчас и обстоит в обозримом прошлом) вакуум остается одним и тем же. Свойства вакуума определяются физикой сверхмалых расстояний и времен, и на них медленное расширение Вселенной не отражается. Поэтому, опять-таки как и требуется, плотность энергии вакуума не зависит от времени. Как мы говорили выше, в общей теории относительности последнее свойство автоматически означает, что энергия вакуума приводит к ускоренному расширению Вселенной. Таким образом, вакуум — это в самом деле подходящий кандидат на роль носителя темной энергии.

Подчеркнем, что отсутствие зависимости плотности энергии от положения в пространстве и от времени — это точные, а не приближенные свойства вакуума, что отличает его от других кандидатов на роль темной энергии. Плотность энергии вакуума — это мировая константа (по крайней мере в той части Вселенной, которую мы наблюдаем). Надо сказать, что эту константу — космологическую постоянную, Λ -член — вводил в свои уравнения еще Эйнштейн. Он, правда, не отождествлял ее с энергией вакуума, но это — вопрос терминологии, по крайней мере при современном понимании существа дела.

Позже Эйнштейн от своей идеи отказался — возможно, напрасно.

Почему же представление о темной энергии как энергии вакуума не удовлетворяет многих физиков? В первую очередь это связано с несуразно малым значением плотности энергии вакуума, которое необходимо для согласия теории и наблюдений.

В вакууме все время рождаются и умирают виртуальные частицы, в нем имеются конденсаты полей — в общем, вакуум скорее похож; на сложную среду, чем на абсолютную пустоту. Это не просто домыслы: особенности вакуума находят свое проявление в свойствах элементарных частиц и их взаимодействиях и в конечном итоге определяются, хотя и косвенно, из многочисленных экспериментов. Энергия вакуума в принципе должна была бы "знать" о том, как он устроен, какова его структура и каковы значения характеризующих его параметров (например, конденсатов полей).

Теперь представим себе теоретика, который изучил физику элементарных частиц, но ничего не слышал о Вселенной. Попросим этого теоретика предсказать плотность энергии вакуума. Исходя из масштабов энергий, характерных для фундаментальных взаимодействий, и соответствующих масштабов длин, он сделает свою оценку — и ошибётся в невообразимое число раз. Мы уже говорили об этом: энергетический масштаб фундаментальных взаимодействий — по крайней мере 200 миллионов электронвольт, а требуемый из наблюдений масштаб, соответствующий энергии вакуума (если темная энергия — это энергия вакуума) — 0,002 электронвольта. Это несоответствие можно выразить и так: наш теоретик предсказал бы такую большую энергию вакуума и такой вызванный ей темп расширения Вселенной, что дома на соседней улице должны были бы разлетаться от нас со скоростями, близкими к скорости света!

Проблему энергии вакуума можно пояснить и несколько иначе. Да, в нашей Вселенной эта энергия очень близка к нулю. Представим теперь себе другую вселенную, где все так же, как у нас, только, скажем, массы элементарных частиц слегка отличаются от наших. Так вот, если это отличие составляет всего одну миллиардную долю, то энергия вакуума в этой другой вселенной будет в триллионы раз больше нашей (по абсолютной величине). Спрашивается, как же в нашей Вселенной произошла такая тонкая подстройка?

Проблема энергии вакуума (ее еще называют проблемой космологической постоянной) ставила в тупик физиков-теоретиков задолго до открытия темной энергии. Так, в 20-х - 30-х годах прошлого века эта проблема волновала В. Паули*), который в 1933 году писал: "Эта энергия [вакуума; тогда использовали термин "энергия нулевой точки", "Nullpunktsenergie"] должна быть ненаблюдаемой в принципе, поскольку она не излучается, не поглощается, не рассеивается ... и поскольку, как очевидно из опыта, она не создает гравитационного поля". Почему так происходит? Одна из возможностей состоит в том, что энергия пустого пространства каким-то образом все же изменяется со временем и, в конце концов, становится близкой к нулю. Конкретные теоретические модели, иллюстрирующие эту возможность, построить чрезвычайно трудно, но можно; еще труднее вписать их в космологический контекст. И уж совсем непонятно, как на этом пути получить объяснение того, что энергия вакуума не настолько близка к нулю, чтобы быть несущественной для космологии, а наоборот, что она принимает требуемое значение. Сделать этого до сих пор никому не удалось.

Если темная энергия — это энергия вакуума, то попытаться понять, почему она имеет столь малую величину, можно, следуя совсем другой логике. Представим себе, что Вселенная чрезвычайно велика, что она во много раз больше, чем наблюдаемая нами часть. Допустим далее, что в разных, весьма обширных частях Вселенной могут реализовываться самые разные вакуумные состояния с самой разной плотностью энергии. Такая возможность, к слову, теоретически не исключена; более того, именно так, судя по всему, обстоит дело в теории суперструн, особенно если Вселенная проходила

инфляционную стадию. Области Вселенной, где плотность энергии вакуума слишком велика по абсолютной величине, выглядят совершенно непохоже на нашу область: там, где энергия вакуума велика и положительна, пространство расширяется настолько быстро, что звезды и галактики просто не успевают образоваться; в областях с большой отрицательной энергией вакуума расширение пространства быстро сменяется сжатием, и эти области коллапсируют задолго до образования звезд. В обоих случаях космологическая эволюция несовместима с существованием наблюдателей, подобных нам. И наоборот, мы могли появиться только там, где плотность энергии вакуума очень близка к нулю — мы там и появились. Здесь напрашивается аналогия с другим, вполне очевидным фактом: мы существуем на планете Земля, более или менее подходящей для жизни, а не в произвольном месте во Вселенной, где условий для жизни нет вовсе.

Такой, как говорят, антропный взгляд на проблему энергии вакуума высказывался более 20 лет назад в работах А. Линде и С. Вайнберга. Сейчас он популярен среди заметной части физиков-теоретиков. Другая часть воспринимает его как способ уйти от вопроса о том, какие физические причины на самом деле обуславливают столь малую наблюдаемую энергию вакуума, и не является ли природа темной энергии совсем другой. Наиболее взвешенный подход, наверное, состоит в том, чтобы не исключать антропного объяснения как возможного конечного ответа, но попытаться все же найти альтернативное решение проблем энергии вакуума и темной энергии.

4.2 Легкие поля

Альтернативой вакууму как носителю темной энергии может служить какое-то новое поле, "разлитое" во Вселенной. В этом варианте энергия нового поля и является темной энергией. Новым это поле должно быть потому, что присутствие всюду во Вселенной известных полей (например, электромагнитного) слишком сильно влияло бы на поведение вещества и приводило бы к эффектам, которые давно были бы обнаружены. Кроме того, известные поля таковы, что их энергия не обладает перечисленными выше свойствами темной энергии.

Гипотетическое новое поле должно характеризоваться энергетическим масштабом 0,002 электронвольт. Хотя это очень малый масштаб с точки зрения известных взаимодействий, он не выглядит совершенно неправдоподобным. Действительно, мы уже знаем, что масштабы разных взаимодействий сильно различаются между собой. Так, упоминавшийся масштаб сильных взаимодействий (200 миллионов электронвольт) в 10^{19} раз меньше масштаба гравитационных сил. Такое гигантское различие, конечно, само по себе требует объяснения, но это отдельный вопрос. В любом случае, существование в природе разных энергетических масштабов — это факт, и введение нового, малого масштаба непреодолимым препятствием не выглядит.

Новое поле, вообще говоря, изменяется в процессе эволюции Вселенной. Изменяется и его плотность энергии. Чтобы это изменение было не слишком быстрым, кванты нового поля — новые частицы — должны иметь чрезвычайно малую массу; говорят, что это поле должно быть легким.

Наконец, новое поле — это новая сила (так же, как гравитационное поле соответствует гравитационным, а электромагнитное — электрическим и магнитным силам). Легкое поле с чрезвычайно малой массой — сила с большим радиусом действия, подобная гравитации.

Чтобы не было противоречия с экспериментами по проверке общей теории относительности, взаимодействие этого поля с обычным веществом должно быть очень слабым, слабее гравитационного.

Все эти свойства не выглядят для теоретика привлекательными, но с ними можно смириться. Важно, что гипотеза о новом поле хотя бы в принципе допускает экспериментальную проверку. Во-первых, в результате более точных измерений темпа

расширения Вселенной на современном этапе и в прошлом может выясниться, что плотность темной энергии меняется с течением времени. Это однозначно отметит гипотезу о вакуумной природе темной энергии и наоборот, послужит указанием на существование во Вселенной нового легкого поля. Во-вторых, в перспективе можно надеяться обнаружить неоднородность распределения темной энергии в пространстве. Это стало бы окончательным доказательством того, что темная энергия — это энергия нового поля, а не что-нибудь еще.

С другой стороны, сегодня не видно способов зарегистрировать новое легкое поле в лабораторных экспериментах, на ускорителях и т.д. Причина — чрезвычайно слабое взаимодействие этого поля с веществом. Такой пессимизм, впрочем, может носить временный характер: мы слишком мало знаем о новом поле, чтобы полностью исключить возможность его прямого экспериментального изучения в будущем. Никогда не говори: "Никогда".

Физики обсуждают разные типы гипотетических легких полей, энергия которых могла бы выступать в качестве темной энергии. В наиболее простом с теоретической точки зрения варианте плотность энергии нового поля *убывает* со временем. Для поля такого типа употребляют термин "квинтэссенция" (иногда используют и термин "космон"). Не исключена, однако, и обратная возможность, когда плотность энергии *растет* со временем; поле такого типа называют "фантомом". Фантом был бы весьма экзотическим полем; ничего подобного до сих пор в природе не встречалось. Различие между квинтэссенцией и фантомом, как мы обсудим ниже, важно с точки зрения удаленного *будущего* Вселенной.

4.3 Новая гравитация

Наконец, еще одно возможное объяснение темной энергии состоит в том, что никакой темной энергии на самом деле нет. Темную энергию приходится привлекать для объяснения особенностей расширения Вселенной в том случае, если космологическая эволюция описывается общей теорией относительности. Если же эта теория неприменима на современных космологических масштабах длин и времен, то и в темной энергии нет необходимости.

Разумеется, при таком взгляде на темную энергию нельзя не учитывать тот факт, что общая теория относительности хорошо проверена на меньших масштабах расстояний. Поэтому нужно создать новую теорию гравитации, которая переходила бы в общую теорию относительности на этих расстояниях, но иначе описывала бы эволюцию Вселенной на сравнительно поздних, близких к нашей стадиях (но не на стадии термоядерных реакций в первые секунды после Большого взрыва). Это — трудная задача, особенно если учесть требование самосогласованности, внутренней непротиворечивости теории. Тем не менее, такие попытки делаются, и некоторые из них выглядят довольно перспективными.

Одна из возможностей состоит в том, чтобы перестать считать ньютоновскую постоянную всемирного тяготения постоянной величиной, разрешить ей меняться в пространстве и во времени, подчиняясь определенным уравнениям. К сожалению, наиболее красивые версии теории, реализующие эту возможность, отвергнуты экспериментами по проверке общей теории относительности. Если же за красотой не гнаться, то модели, объясняющие ускоренное расширение Вселенной и согласующиеся со всем, что известно про гравитацию, построить на этом пути можно. Такие модели, как правило, предсказывают отклонения от общей теории относительности, которые хотя и малы, но в перспективе экспериментально обнаружимы.

Отметим еще идею о том, что наше пространство может иметь больше трех измерений, при этом дополнительные измерения на обычных расстояниях ничем себя не проявляют. В то же время, на космологических расстояниях в миллиарды световых лет

силовые линии гравитационного поля могут "расползаться" в дополнительные измерения, отчего гравитация не будет больше описываться обычным законом Ньютона. Может измениться и закон расширения Вселенной. Вполне удовлетворительной теории, объясняющей таким образом ускоренное расширение Вселенной, до сих пор не построено; в предложенных к настоящему времени моделях эта идея реализована лишь отчасти. Замечательно, тем не менее, что эти модели приводят к своим предсказаниям для эксперимента. Среди них — возможность изменения гравитационного закона Ньютона на *малых* расстояниях; малые, но обнаружимые поправки к общей теории относительности в Солнечной системе и т.д.

Итак, открытые недавно особенности расширения Вселенной поставили новый вопрос: обязаны ли они энергии вакуума, энергии нового легкого поля или новой гравитации на сверхбольших расстояниях? Теоретическое изучение этих возможностей в самом разгаре, а ответ, как обычно в физике, в конечном итоге должны дать новые эксперименты.

5 Темная энергия и будущее Вселенной

С открытием темной энергии сильно изменились представления о том, каким может быть отдаленное будущее нашей Вселенной. До этого открытия вопрос о будущем однозначно связывался с вопросом о кривизне трехмерного пространства. Если бы, как многие раньше считали, кривизна пространства на $2/3$ определяла современный темп расширения Вселенной, а темная энергия отсутствовала, то Вселенная расширялась бы неограниченно, постепенно замедляясь. Теперь же понятно, что будущее определяется свойствами темной энергии.

Поскольку мы эти свойства знаем сейчас плохо, предсказать будущее мы пока не можем. Можно только рассмотреть разные варианты. Про то, что происходит в теориях с новой гравитацией, сказать трудно, но другие сценарии есть возможность обсудить уже сейчас. Если темная энергия постоянна во времени, как в случае энергии вакуума, то Вселенная будет всегда испытывать ускоренное расширение. Большинство галактик в конце концов удалится от нашей на громадное расстояние, и наша Галактика вместе с немногими соседями окажется островком в пустоте. Если темная энергия — квинтэссенция, то в далеком будущем ускоренное расширение может прекратиться и даже смениться сжатием. В последнем случае Вселенная вернется в состояние с горячей и плотной материей, произойдет "Большой взрыв наоборот", назад во времени.

Еще более драматическая судьба ожидает Вселенную, если темная энергия — фантом, причем такой, что его плотность энергии возрастает неограниченно. Расширение Вселенной будет все более и более быстрым, оно настолько ускорится, что галактики будут вырваны из скоплений, звезды из галактик, планеты из Солнечной системы. Дело дойдет до того, что электроны оторвутся от атомов, а атомные ядра разделятся на протоны и нейтроны. Произойдет, как говорят, большой разрыв.

Такой сценарий, однако, представляется не очень вероятным. Скорее всего, плотность энергии фантома будет оставаться ограниченной. Но и тогда Вселенную может ожидать необычное будущее. Дело в том, что во многих теориях фантомное поведение — рост плотности энергии со временем — сопровождается неустойчивостями фантомного поля. В таком случае фантомное поле во Вселенной будет становиться сильно неоднородным, плотность его энергии в разных частях Вселенной будет разной, какие-то части будут быстро расширяться, а какие-то, возможно, испытают коллапс. Судьба нашей Галактики будет зависеть от того, в какую область она попадет.

Все это, впрочем, относится к будущему, отдаленному даже по космологическим меркам. В ближайшие 20 миллиардов лет Вселенная будет оставаться почти такой же, как сейчас. У нас есть время для того, чтобы разобраться в свойствах темной энергии и тем самым более определенно предсказать будущее — а может быть, и повлиять на него.