**Внутренняя симметрия Вселенной**

Артур Давидович Чернин, д.ф.-м.н., проф., гл.н.с. ГАИШ.

Из чего сделана Вселенная? Аристотель, а за ним и другие мудрецы классической древности, на этот вопрос отвечали так: все в мире состоит из четырех стихий - огня, воды, воздуха и земли. Удивительно, но в космологии наших дней тоже есть ровно четыре стихии, или, как их сейчас называют, космические энергии, из которых построено все на свете. Одна из новых стихий космологии - космический вакуум, открытый совсем недавно, в 1998-1999 гг. Он вносит наибольший вклад в энергию современной Вселенной, сколь неожиданно это ни звучит. Дело в том, что вакуум в физике - не пустота, а особая среда, в которую погружены все тела природы. Космический вакуум обладает определенной энергией, и на нее действительно приходится приблизительно 70% полной энергии мира. Исследования реликтового излучения, наблюдения далеких вспышек сверхновых звезд, изучение темных гало галактик и скоплений явно указывают на это. Три другие энергии Вселенной - темное вещество, которое вносит 25% (округленно), «обычное» вещество, которое дает 4%, и излучение, вклад которого весьма мал - 0.01%.

Спиральная галактика Мессье 83 и подобные ей звездно-газовые системы демонстрируют сложность и разнообразие поведения барионного вещества во Вселенной. Но не оно - главное действующее лицо нашего мира. Основную роль в динамике Вселенной играют ее невидимые компоненты: темное вещество и темная энергия, о структуре и свойствах которых мы пока знаем очень мало.

Эти процентные доли относятся к современному состоянию мира; в ходе эволюции Вселенной они изменялись из-за общего космологического расширения. Например, в ранней Вселенной, при возрасте мира в несколько минут, начиная с которого история мира уверенно прослеживается современной наукой, доля вакуума была близка к нулю, доля же излучения приближалась к 100%. Такой переменный рецепт космической смеси кажется слишком сложным, случайным, а то и странным или даже абсурдным. Но это только на первый взгляд. Мы увидим, что на самом деле за всем этим скрывается простая и не зависящая от времени закономерность. Закономерность эта представляет собой особого рода симметрию, которая - в отличие от знакомых всем геометрических симметрий - не касается пространственно-временных отношений. Симметрии негеометрического характера называют внутренними симметриями. Простой пример внутренней симметрии давно известен в физике элементарных частиц: она объединяет протон и нейтрон, несмотря на их очевидные различия, в единое целое - дублет нуклонов. Внутренняя симметрия в космологии объединяет четыре космические энергии и указывает на существование в природе не известных ранее глубинных связей.

**Четыре энергии**

Начнем с краткой сводки современных данных о четырех космических стихиях. Скажем сразу, что наши сведения по большей части скудны и неопределенны. Прежде всего это касается физической природы и микроскопической структуры космических энергий. В рамки современной фундаментальной физики укладываются только обычное вещество и излучение, на которые приходится всего чуть больше 4% полной энергии Вселенной. Обычное вещество - это протоны, нейтроны и электроны, из которых состоят Земля и все, что на ней, включая и нас самих, а также планеты и звезды. Это вещество принято называть барионным (хотя электроны к барионам, т.е. тяжелым частицам, и не относятся).

Но даже и с барионами далеко не все ясно. Главный вопрос: почему в мире имеются протоны и нейтроны, но не наблюдаются в тех же количествах антипротоны и антинейтроны? Ведь согласно одному из фундаментальных законов физики, в природе должно иметь место равноправие между частицами и античастицами. То же относится, разумеется, и к электронам: их античастицы позитроны - большая редкость в естественных условиях. Возможный путь к решению проблемы был намечен А.Д.Сахаровым и В.А.Кузьминым более 30 лет назад; с тех пор многое в этом направлении было сделано теоретиками разных стран, но полного и окончательного ответа на вопрос до сих пор нет.

С излучением дела обстоят намного лучше - оно определенно представляет собой остаток, реликт некогда плотного и очень горячего состояния вещества на ранних этапах эволюции Вселенной. Это было угадано Г.А.Гамовым в 1940-1950-е годы и подтверждено дальнейшими прямыми наблюдательными открытиями. Излучение - это фотоны и нейтрино (а возможно, и гравитоны), которые находились в термодинамическом равновесии с веществом и тоже были очень горячими в далеком прошлом. Затем, в ходе космологического расширения, излучение охладилось до наблюдаемой сейчас очень низкой температуры - всего около 3 К (фотоны) или 2 К (нейтрино). При этом сами фотоны и нейтрино не исчезли, и их полное число сохранилось до наших дней (о том, по какому объему считать частицы, - см. ниже). Этих частиц довольно много - приблизительно тысяча в каждом кубическом сантиметре пространства. Излучение почти идеально равномерно заполняет весь объем Вселенной, тогда как барионы (и темное вещество) собраны в сгущения разного пространственного масштаба, которые и образуют все наблюдаемое многообразие космических систем.

Число барионов тоже сохраняется при расширении мира, но их «поштучно» гораздо меньше - всего одна частица на кубический метр пространства. Отношение числа фотонов к числу барионов - огромное безразмерное «барионное число», равное по порядку величины миллиарду. Из-за неясности с антибарионами (см. выше) его физическая природа представляет собой большую загадку космологии и фундаментальной физики.

Что касается темного вещества, то оно целиком остается вне рамок «стандартной модели» физики элементарных частиц - нынешняя фундаментальная физика ничего подобного не предусматривает. Темное вещество до сих пор ускользает от прямого физического эксперимента, несмотря на многолетние усилия в этом направлении. Но надежно установлено, что его в природе по крайней мере в пять-шесть раз больше по массе, чем обычного вещества. Темное вещество заполняет огромные объемы вокруг галактик, их групп и скоплений. Оно не светится и проявляет себя только своим тяготением. В космологии обычно предполагается, что носителями темного вещества служат неизвестные пока стабильные элементарные частицы довольно большой массы, приблизительно в тысячу раз превышающей массу протона. В отличие от протонов и нейтронов, эти частицы не чувствуют «сильных» ядерных сил, но участвуют, как и электроны, в электрослабом взаимодействии. Темные частицы, будучи, как и фотоны с барионами, стабильными, сохраняются в ходе космологического расширения. Главная загадка здесь - почему природа так любит эти частицы, что отдает им сейчас четверть всей своей энергии?

Распределение галактик (желтые точки) в тонком слое Вселенной, «просканированном» с помощью двух обзоров красных смещений галактик - обзора Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра (CfA) и Слоановского цифрового обзора неба (SDSS). Наша Галактика находится в вершине клиновидных карт, расстояние от нее указано в миллионах световых лет. Как видим, в масштабе миллиарда световых лет распределение вещества во Вселенной еще весьма неоднородно: видны скопления и сверхскопления галактик, объединенные в несколько «великих стен», протянувшихся по прямому восхождению (которое указано в часах дуги).

Но самая трудная проблема фундаментальной физики и космологии - природа и микроскопическая структура космического вакуума. Энергию вакуума принято называть темной энергией, и она действительно темна - не излучает, не отражает и не поглощает света, так что ее невозможно увидеть. Она проявляет себя только тем, что создает… антитяготение. По этому динамическому эффекту она и была обнаружена на самых больших космологических расстояниях [1, 2]. Тот же эффект позволил заметить ее присутствие и в нашем ближайшем галактическом окружении, на расстояниях в 1-3 Мпк [3, 4].

Веками говорили: тяготение - сила, что движет мирами. Теперь же приходится признать, что и расширением Вселенной как целого, и движением галактик вблизи нас управляет не тяготение, а антитяготение (подробнее об этом см., например, в книге [5]).

Антитяготение до недавнего времени не выдавало себя ни в астрономических наблюдениях, ни в физическом эксперименте. Но в теоретической физике о нем говорят и спорят давно - с тех пор как в 1917 г. Эйнштейн добавил в уравнения общей теории относительности «космологическую постоянную». Она-то и описывает антитяготение как силу взаимного отталкивания, действующую между всеми телами природы. Эту силу создают не сами тела, а темная энергия вакуума, в которую тела погружены. Плотность темной энергии прямо связана с космологической постоянной, как впервые установил Э.Б.Глинер еще в 1965 г. [6]; поэтому плотность темной энергии вакуума постоянна в пространстве и неизменна во времени.

**Фридмановские интегралы**

Каждой из четырех космических энергий можно сопоставить определенную физическую величину размерности длины, называемую фридмановским интегралом. Она была введена в космологию в знаменитой работе А.А.Фридмана 1922 года, с которой, как известно, и началась современная теория расширяющейся Вселенной. У Фридмана эта величина характеризовала обычное (нерелятивистское) вещество и выражалась через полное число частиц этого вещества в заданном расширяющемся объеме. Число частиц вещества сохраняется при космологическом расширении, и вместе с ним неизменным во времени оказывается и фридмановский интеграл. В точности по этому образцу мы можем ввести фридмановский интеграл для барионов, а также и еще два интеграла - один для темного вещества, а другой для излучения. Это возможно, поскольку, как мы уже говорили, число барионов, число темных частиц и число фотонов излучения сохраняются со временем. Что же касается вакуума, то никаких частиц у него нет. Но общее правило составления фридмановского интеграла можно, как оказывается, легко распространить и на вакуум; только в этом случае в качестве сохраняющейся величины, через которую этот интеграл выражается, будет служить плотность вакуума.

Для полной определенности нужно еще договориться о том, в каком именно объеме вычисляется полное число частиц в каждом из невакуумных интегралов. Естественней всего в качестве такового взять полный объем Вселенной, доступный наблюдениям, - тогда эти три величины будут иметь «истинно космологический» смысл. Наблюдениям доступен сферический объем с радиусом порядка 10 млрд св. лет. Этот радиус называют расстоянием до горизонта мира: таков путь, который проходит свет за все время существования Вселенной, и дальше этого расстояния действительно не заглянуть. Так как современный возраст мира составляет по порядку величины 10 млрд лет, свет успевает за это время пройти расстояние, равное возрасту, умноженному на скорость света, - так и получается 10 млрд св. лет.

Возможно, последней величине принадлежит и еще более важная роль в космологии. Недавно парижский космолог (или космотополог, как он сам себя называет) Ж.-П.Люмине [7] выдвинул интереснейшую идею о том, что объем реальной Вселенной не бесконечен, как чаще всего считалось до сих пор, а конечен. Последнее, разумеется, никак не мешает ему неограниченно расширяться со временем. Причем в современную эпоху радиус мира как раз (!) близок к расстоянию до горизонта. Самое важное состоит в том, что это не просто умозрительная гипотеза, каких немало уже было в прошлом: в пользу такой возможности определенно свидетельствуют недавние наблюдения реликтового излучения (точнее, уровня его анизотропии) на самых больших угловых масштабах. Так впервые в истории космологии было получено реальное наблюдательное указание на конечность пространства. Если идея Люмине подтвердится в дальнейших исследованиях, это станет одним из самых замечательных открытий во всей истории науки.

Как бы то ни было, вычисляя первые три фридмановские интеграла по объему с радиусом в 10 млрд световых лет, найдем, что по порядку величины их численные значения близки друг к другу, а также и к четвертому (вакуумному) интегралу. Если измерять значения фридмановских интегралов в миллиардах световых лет, то интеграл для вакуума будет равен 10, для темного вещества - 3, для барионов - 0.3, для излучения - 0.1.

Этот набор четырех чисел (слегка округленных) никак не похож на процентные доли, которыми описываются вклады четырех энергий в полную энергию мира (см. выше). Теперь рецепт космической смеси записан не в долях полной энергии, а на языке фридмановских интегралов. Так как интегралы не зависят от времени, мы имеем «вечный» рецепт, который остается одним и тем же во все времена, когда четыре энергии вообще существуют в природе. Эти четыре числа не слишком малы и не слишком велики - они порядка единицы, как принято говорить о величинах в пределах от 0.1 до 10. Так что в новом рецепте нет ничего особенного - он не кажется ни сложным, ни странным; напротив, он выглядит просто и естественно. И даже как будто не нуждается в каком-либо специальном объяснении.

Но удивительно все же, что различие четырех фридмановских интегралов так невелико. А в принципе они ведь могли бы отличаться друг от друга сколь угодно сильно - на множество и множество порядков: никаких ограничений на этот счет не вытекает ни из каких фундаментальных принципов. Близость интегралов по порядку величины - это эмпирический факт, который прямо вытекает из совокупности конкретных наблюдательных данных о плотностях космических энергий. Причем этих данных для нашей цели оказалось достаточно, так что все загадки и неопределенности, относящиеся к микроскопической структуре четырех энергий, этому нисколько не помешали.

Численную близость фридмановских интегралов вряд ли можно считать простой арифметической случайностью. Скорее в этом факте нужно видеть указание на то, что космическая смесь - это отнюдь не случайный набор ингредиентов; между четырьмя энергиями определенно имеется нечто общее. Это общее проявляется на феноменологическом уровне в приближенном равенстве интегралов и означает наличие в природе особого рода внутренней (негеометрической) симметрии, объединяющей все четыре космические энергии.

По самому общему определению симметрия «обозначает тот вид согласованности отдельных частей, которая объединяет их в единое целое». Так говорил об этом Г.Вейль, один из крупнейших математиков ушедшего века, автор знаменитой книги о симметриях [8]. В данном случае имеются четыре весьма различные по своей физической сути космические энергии, но между ними существует определенная согласованность - приближенное равенство фридмановских интегралов, - что и объединяет их в одно целое, в квартет космических энергий. (Симметрия барионов и излучения была замечена вскоре после открытия реликтового излучения [9], а симметрия всех четырех энергий - после открытия космического вакуума [10].)

Хотя фридмановские интегралы были вычислены по современным значениям космологических величин, сами по себе они константы, а это означает, что их равенство, а с ним и внутренняя симметрия космических энергий, - неизменное свойство эволюционирующей Вселенной. Можно также убедиться, что симметрия ковариантна: она сохраняет свой смысл в любой системе отсчета. Она также устойчива - в том смысле, что не сильно зависит от тонких деталей наблюдательных данных или ошибок их определения.

Нужно еще отметить, что симметрия энергий является не строгой, а приближенной, слабо нарушенной; и это тоже одно из важных ее свойств. Как заметил Л.Б.Окунь [11], «понятие симметрии неразрывно связано с представлением о красоте. При этом истинная, высшая красота требует небольшого нарушения симметрии, придающего ей таинственный и манящий элемент незаконченности».

**Проблемы и решения**

Обнаружение внутренней симметрии привнесло порядок в космическую энергетику. В ней произошло, как сказал бы М.В.Ломоносов, «соединение вещей далековатых». В результате мы лучше понимаем теперь, из чего и как сделана Вселенная. Действительно, новая симметрия позволила увидеть в новом свете ряд классических и совсем свежих космологических проблем, которые до сих пор не поддавались решению и казались никак не связанными друг с другом.

Обратимся прежде всего к уже упомянутой выше проблеме большого барионного числа: почему это число столь неестественно велико? Барионное число можно выразить через фридмановские интегралы для излучения и барионов, и тогда ответ на вопрос станет очевидным: это число столь велико потому, что фридмановские интегралы близки друг к другу и имеют именно те численные значения, которые имеют.

Сразу после открытия космического вакуума возникла проблема «совпадения плотностей»: почему плотность вакуума и современная плотность темного вещества почти равны? Ведь одна из них не зависит от времени, а другая падает в ходе космологического расширения. Собственно, от этих двух плотностей не так уж далеки и две другие - современные плотности барионов и излучения. Это еще один вопрос, на который симметрия космических энергий обязана дать ясный ответ, раз уж она объединяет эти энергии. И симметрия свой ответ дает. Четыре наблюдаемые плотности близки по двум причинам: во-первых, их близость в принципе возможна из-за того, что четыре фридмановских интеграла приближенно равны, и во-вторых, это случилось именно в нашу эпоху, ибо как раз в нашу эпоху фридмановские интегралы близки к радиусу (видимой) Вселенной [12].

Процентный состав Вселенной (по массе).

На последнем обстоятельстве стоит остановиться. Действительно, фридмановские интегралы не зависят от времени, они константы. А радиус Вселенной растет со временем благодаря космологическому расширению. Например, при возрасте мира в несколько минут этот радиус был в миллиард раз меньше, чем сейчас. И только к нынешней эпохе он вырос настолько, что приблизился к фридмановским интегралам; он практически точно равен сейчас интегралу для вакуума. Ясно, что по этой причине современное состояние Вселенной нужно считать особенным, выделенным во всей истории мира. В чем же особенность современной Вселенной? С некоторой точки зрения эта выделенность очевидна. Действительно, Вселенная сейчас не слишком молода, так что в ней уже заготовлено достаточно углерода и кислорода, - а они нужны для зарождения и развития жизни. С другой стороны, она все еще в цветущем возрасте, так что в ней имеется много звезд, таких как Солнце, которые способны обеспечить жизнь необходимым светом и теплом. Эти соображения восходят к так называемому Антропному принципу, согласно которому наблюдаемая Вселенная такова, как она есть, потому что в ней имеется жизнь, разум и присутствуют наблюдатели - мы с вами [13].

Антропный принцип - это вполне здравое утверждение о том, что все свойства нашей Вселенной (даже еще не открытые) должны не противоречить существованию в ней тех объектов, которые нам уже известны, в том числе и человека. Связь человека со Вселенной иллюстрирует этот рисунок К.Фламмариона.

К этому принципу можно вообще-то относиться по-разному, но одно в нем бесспорно: возможность нашего существования в мире действительно ограничена рядом условий, о которых только что сказано в самом общем виде. Эти условия можно совсем коротко суммировать так: мы существуем и притом именно сейчас, поскольку в нашу эпоху радиус мира близок к значению фридмановских интегралов. Так благодаря внутренней симметрии Антропный принцип приобретает новый более определенный физический смысл.

Почему наблюдаемое сейчас трехмерное (сопутствующее) пространство мира почти плоское? Это одна из классических проблем космологии, поставленная еще 30-40 лет назад. Как оказывается, за видимой картиной почти эвклидова пространства Вселенной стоит в действительности баланс между тяготением вещества и антитяготением темной энергии [14]. Этот баланс контролируется внутренней симметрией энергий, которая полностью исключает сколько-нибудь существенные отклонения от эвклидовости пространства в настоящую эпоху, а также в любой момент в прошлом или будущем.

Таков не полный еще набор проблем, к которым идея внутренней симметрии предлагает общий подход. Тем самым ряд разных вопросов сводится к одному: а откуда взялась сама эта симметрия?

При вопиющем недостатке знаний о микроскопической структуре космических энергий поиски ответа на этот вопрос должны представляться делом безнадежным. И все же некоторые предварительные суждения о физике внутренней симметрии можно - со всеми необходимыми оговорками - высказать уже сейчас, не дожидаясь дальнейшего прогресса фундаментальной теории. Согласно нашей модели [10, 15], внутренняя симметрия возникла эволюционным путем в очень ранней Вселенной, когда температура в ней была столь высока, что тепловая энергия каждой частицы приближалась к энергии покоя частицы темного вещества. Если масса темной частицы действительно близка к тысяче масс протона (см. выше), то соответствующая энергия равна приблизительно одному эргу, или одному тераэлектронвольту. Такой энергии придается нередко центральная роль как в космологии, так и в физике элементарных частиц [11]. Можно ожидать, что еще в текущем десятилетии это предположение будет опровергнуто или подтверждено, когда подобные энергии станут доступными в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе. Тогда, возможно, разъяснится и то особое расположение, которое природа питает к частицам темного вещества, отдавая им сейчас львиную долю своей невакуумной энергии.

**Список литературы**

1. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. // Astronom. J. 1998. V.116. P.1009.

2. Perlmuter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. // Astrophys. J. 1999. V.517. P.565.

3. Chernin A.D., Teerikorpi P., Baryshev Yu.V. // Adv. Space Res. 2003. V.31. P.459; astro-ph//0012021 (2000).

4. Chernin A.D., Karachentsev I.D., Valtonen V.J. et al. // Astron. Astrophys. 2004. V.415. P.19.

5. Черепащук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003. С.315.

6. Глинер Э.Б. // ЖЭТФ. 1965. Т.49. С.542.

7. Luminet J. -P. et al. // Nature. 2003. V.425. P.593.

8. Вейль Г. Симметрия. М., 1972.

9. Chernin A.D. // Nature. 1968. V.220. P.250.

10. Чернин А.Д. // УФН. 2001. V.171. P.1153.

11. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М., 1988. С.272.

12. Chernin A.D. // New Astron. 2002. V.7. P.113.

13. Розенталь И.Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. М., 1984.

14. Chernin A.D. // New Astron. 2003. V.8. P.59.

15. Чернин А.Д. // astro-ph//053358 (2005).