

## Дружественная разуму Вселенная

А. Д. Чернин

Государственный астрономический институт им. Штернберга

Космология — неотъемлемый элемент общенаучного фона, на котором развиваются исследования по проблеме SETI. Наш космический дом для жизни неплохо оборудован, вопреки ощущению известного “горлана, главаря”. Новейшие успехи науки о Вселенной лишней раз подтверждают: огромный мир, в котором мы живем, доступен нашему пониманию, он не враждебен, а наоборот — дружелюбен нам.

**INTELLIGENCE-FRIENDLY UNIVERSE, by A.D.Chernin.** Cosmology is an essential part of our general scientific background against which SETI research develops. Our cosmic home is fairly liveable whatever our famous “loud-mouthed ring-leader” [i.e., Soviet poet Vladimir Mayakovsky] would say. The most recent achievements in the science of the Universe confirm once again that we are capable of understanding the vast world we are living in, that it is not hostile, but on the contrary, that it is friendly to us.

### Сложный и абсурдный?

Из чего сделана Вселенная? В классической древности на этот вопрос отвечали так: все в мире состоит из четырех стихий — это огонь, вода, воздух и земля. В космологии наших дней рассматриваются тоже ровно четыре стихии, или как их сейчас называют, космические энергии, из которых состоит все на свете. Одна из энергий — это энергия космического вакуума, открытого совсем недавно, в 1998–99 гг. Она вносит наибольший вклад в энергию современной Вселенной, сколь бы неожиданно это не звучало. 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 вспышек далеких сверхновых звезд, изучение темных гало галактик и скоплений определенно указывают на это. Три другие компоненты — темное вещество, которое вносит 25% (в круглых цифрах) в энергию Вселенной, “обычное” вещество, которое дает 4%, и излучение, вклад которого весьма мал — 0,01%. Это процентное соотношение относится к современному состоянию мира, и в ходе эволюции Вселенной оно изменялось из-за общего космологического расширения. Например, доля энергии вакуума была близка к нулю в ранней Вселенной при возрасте мира в несколько минут, начиная с которого история мира уверенно прослеживается современной наукой, а доля излу-

чения приближалась тогда к 100%. Такой меняющийся 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.

Эта закономерность проявляется в особом роде симметрии, 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 неизвестных ранее глубинных связей.

### Четыре энергии

Приведем краткую сводку современных данных о четырех космических стихиях. Скажем сразу, что эти знания по большей части скудны и неопределенны. Прежде всего это касается физической природы и микроскопической структуры космических энергий. В рамки современной фундаментальной физики вписываются только обычное вещество и излучение, на которые приходится всего чуть больше четырех процентов полной энер-

гии 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, то есть 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 равновесие 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 было сделано, но полного и окончательного ответа на этот 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 1940–50-е годы и подтверждено дальнейшими прямыми наблюдательными открытиями. Фотоны и нейтрино (а возможно и гравитоны), из которых состоит излучение, находились в термодинамическом равновесии с веществом и тоже были очень горячими в далеком прошлом. Затем, в ходе космологического расширения, эти частицы охладились до наблюдаемой сейчас очень низкой температуры — всего около трех (фотоны) или двух (нейтрино) градусов выше абсолютного нуля. Причем их полное число сохранилось до наших дней. Этих частиц довольно много — приблизительно тысяча в каждом кубическом сантиметре пространства. Излучение почти идеально равномерно заполняет весь объем Вселенной.

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”, близко к миллиарду по порядку величины. Из-за неясности с антибарионами (см. выше) его происхождение представляет собой большую загадку космологии и фундаментальной физики.

Что касается темного вещества, то оно целиком остается вне рамок “стандартной модели” физики элементарных частиц — в нынешнем своем варианте она ничего подобного не предусматривает. Темное вещество до сих пор ускользает от прямого физического эксперимента, несмотря на многолетние усилия в этом направлении. Но надежно

известно, что в природе его по крайней мере в 5–6 раз больше, чем обычного вещества. Темное вещество заполняет огромные объемы вокруг галактик, их групп и скоплений. Оно не светится и проявляет себя только своим тяготением — согласно надежным наблюдательным данным. В космологии считается вероятным, что темное вещество состоит из неизвестных пока стабильных элементарных частиц 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 стабильными, сохраняются в ходе космологического расширения. Главная загадка здесь — почему природа настолько любит эти частицы, что отдает им сейчас четверть всей своей энергии?

Но самая трудная проблема фундаментальной физики и космологии — природа и микроскопическая структура космического вакуума. Энергию вакуума принято называть темной энергией. Вакуум действительно является “темным” в том смысле, что он не излучает, не отражает и не поглощает света — увидеть его невозможно. Он проявляет себя только тем, что создает ... антитяготение. По этому динамическому эффекту вакуум и обнаружили на самых больших космологических расстояниях, на полпути к горизонту мира (Riess et al., 1998; Perlmutter et al., 1999). Тот же эффект позволил заметить присутствие темной энергии и в нашем ближайшем галактическом окружении, на расстояниях в 1–3 Мпк (Chernin et al., 2000; 2004).

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 Черепашука и Чернина (2003)).

Антитяготение не было до недавнего времени известно 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 который тела погружены. Плотность темной энергии прямо связана с космологической постоянной, и потому она постоянна в пространстве и неизменна во времени.

## Симметрия

О космических энергиях известно, как мы видим, не так уж много. Важные вопросы, касающиеся их физики, остаются по большей части без ответа. Замечательно, однако, что каждую из них можно описать макроскопически (то есть усредненно по тем или иным пространственным масштабам) как некую среду с определенным значением плотности, а эта плотность довольно надежно измерена в космологических наблюдениях. Известно также и давление каждой космической энергии. У барионов и темного вещества давление столь мало по сравнению с плотностью энергии, что его можно просто считать равным нулю. У излучения давление сравнимо с плотностью энергии и составляет от нее одну треть. В случае же вакуума давление отрицательно и равно плотности темной энергии, взятой со знаком минус; последнее было выяснено еще в 1965-м году (Глинер, 1965). Именно из-за своего отрицательного давления вакуум создает не тяготение, как три другие энергии, а антитяготение (см. опять книгу Черепашука и Чернина (2003)).

Зная связь между давлением и плотностью данной космической энергии, мы можем узнать, как она ведет себя в ходе расширения Вселенной. На это указывает один из самых общих законов природы – закон сохранения “внутренней” энергии, известный еще со времен создания классической термодинамики. Этот закон содержится и в общей теории относительности; в явном виде он дается одним из двух основных уравнений космологии, найденных в 1922–24 гг. нашим знаменитым космологом А.А. Фридманом. Из этого закона вытекает, в частности, что полное число частиц (в данном расширяющемся объеме) не меняется со временем. Это относится к частицам трех невакуумных энергий — барионам, фотонам и нейтрино, темным частицам. Что же касается вакуума, то он вообще никак не меняется при расширении, и, в частности, его плотность остается неизменной. Об этих четырех сохраняющихся характеристиках мы уже упоминали выше, сейчас же обсудим их подробнее.

Уравнения Фридмана подсказывают — четыре сохраняющиеся величины можно записать так, что все они будут иметь одну и ту же размерность. Например, размерность энергии или, скажем, длины. В таком случае их можно будет сравнивать друг с другом. Без потери общности мы выразим их в единицах длины и будем называть фридмановскими интегралами (это действительно постоянные, возникающие при интегрировании по времени уравнения Фридмана).

Для полной определенности нужно еще догово-

риться 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 около 10 млрд. световых 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.

Возможно, последняя величина играет еще более важную роль в космологии. Недавно парижский космолог (или космополог, как он сам себя называет) Ж.-П. Люмине (Luminet, 2003) 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. При этом в современную эпоху радиус мира как раз(!) близок к расстоянию до горизонта. В пользу этой возможности определенно свидетельствуют недавние наблюдения реликтового излучения (точнее, уровня его анизотропии) на самых больших угловых масштабах.<sup>1</sup>

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.

Соотношение между числами в этом наборе близко к отношению вкладов четырех энергий в полную энергию мира (см. выше). Но теперь рецепт космической смеси записан не в ее долях, а на языке фридмановских интегралов. Так как они не зависят от времени, мы имеем “вечный” рецепт, не меняющийся с момента возникновения четырех энергий 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

<sup>1</sup> ...

от друга сколь угодно сильно — на множество и множество порядков: никаких ограничений на этот счет не вытекает ни из каких фундаментальных принципов. Замечательная близость интегралов по порядку величины — это эмпирический факт, который мы извлекли с помощью теории из совокупности отдельных конкретных наблюдательных данных. Причем этих данных для нашей цели оказалось достаточно, так что все загадки и неопределенности, относящиеся к микроскопической структуре четырех энергий, этому нисколько не помешали.

Важнее, однако, даже другое: четыре энергии сильно не похожи друг на друга, как это видно из всего сказанного выше; но при всем своем своеобразии они характеризуются одной сохраняющейся величиной — фридмановским интегралом, который почти одинаков для них всех. Это совпадение 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 симметрии, она «обозначает тот вид согласованности отдельных частей, которая объединяет их в единое целое». Это сказано Германом Вейлем, одним из крупнейших математиков ушедшего века, автором знаменитой книги о симметриях (русский перевод: Г. Вейль, «Симметрия», М.: Мир, 1972). 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 (Chernin, 1968), а симметрия всех четырех энергий — после открытия космического вакуума (Чернин, 2001)).

Хотя значения фридмановских интегралов были получены из современных космологических параметров, 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 их ошибок.

Нужно также отметить, что симметрия энергий является не строгой, а приближенной, слабо нарушенной — это тоже одно из важных ее свойств. Как говорит Л.Б. Окунь (1988), «понятие симметрии неразрывно связано с представлением о красоте. При этом истинная, высшая красота требует небольшого нарушения симметрии, придающего ей таинственный и манящий элемент незавершенности.»

## 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, как и почему 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.

1. Обратимся прежде всего к уже упомянутой выше проблеме большего 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.

2. 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 дает свой ответ. 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 (Chernin, 2002).

3. 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 нынеш-

ней 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 (Розенталь, 1984). 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.

4. Почему наблюдаемое сейчас трехмерное (сопутствующее) пространство мира почти плоское? Это одна из классических проблем космологии, поставленная еще 30–40 лет назад. Ответ на этот вопрос, как оказывается (Chernin, 2003), в точности тот же, что и на вопрос о совпадении плотностей (см. выше).

5. Почему наша Галактика Млечный Путь и другие похожие на нее космические структуры возникли в близкую к нам эпоху, а не гораздо раньше и не гораздо позже? И на этот вопрос дается тот же ответ. Но с одним дополнением: здесь важно, как оказывается, не только то, что интегралы близки друг к другу, но и то, что симметрия слабо нарушена, и интегралы реально немного отличаются друг от друга (Чернин, 2005).

Таков не полный еще набор “далековатых” друг от друга вопросов, к которым идея внутренней симметрии предлагает общий подход, на которые она дает единый ответ. 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. Так оно, конечно, и есть. 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 (Чернин, 2001; 2005), 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. Последняя равна приблизительно одному эргу, или одному терраэлектронвольту, если масса темной частицы действительно близка к тысяче масс протона (см. выше). Такой энергии придается нередко центральная роль как в космологии, так и в физике элементарных частиц. Можно ожидать, что еще в текущем десятилетии наше предположение будет опровергнуто или подтверждено, когда подобные энергии станут доступными для исследования на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН. Тогда, возможно, разъяснится и то особое расположение, которое природа питает к частицам темного вещества, отдавая им сейчас львиную долю своей невакуумной энергии.

## Список литературы

- Глинер Э.Б., 1965, ЖЭТФ, **49**, 542  
 Окунь Л.Б., 1988, Физика элементарных частиц, Наука, М.  
 Розенталь И.Л., 1984 Элементарные частицы и структура Вселенной, Наука, М.  
 Черепашук А.М., Чернин А.Д., 2003, Вселенная, жизнь, черные дыры, Век-2, Фрязино  
 Чернин А.Д., 2001, УФН, **171**, 1153  
 Чернин А.Д., 2005, astro-ph//053358  
 Chernin A.D., 1968, Nature, **220**, 250  
 Chernin A.D., 2002, New Astron., **7**, 113  
 Chernin A.D., 2003, New Astron., **8**, 59  
 Chernin A.D., Teerikorpi P., Baryshev Yu.V., 2000, (astro-ph//0012021); Adv. Space Res., 2003, **31**, 459  
 Chernin A.D., Karachentsev I.D., Valtonen V.J., 2004, A&A, **415**, 19  
 Luminet J.-P. et al., 2003, Nature, **425**, 593  
 Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al., 1999, ApJ, **517**, 565  
 Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al., 1998, AJ, **116**, 1009