

## **Чернин А.Д. Вакуум вокруг нас и во Вселенной**

Самое главное, что до сих пор известно о вакууме, это то, что из него никаким способом нельзя извлекать энергию. Вакуум – это такое состояние квантовых полей, в котором энергия этих полей минимальна. Это еще не означает, что энергия, заключенная в вакууме, равна нулю.

О вакууме известно также, что его энергия ... бесконечна. Но это мнимая бесконечность, которая не имеет физического смысла. Формальная бесконечность возникает в неправильном математическом расчете, а правильно вычислять энергию вакуума физики-теоретики пока не умеют. В их расчетах получается, что энергия вакуума бесконечна не только для всей бесконечной Вселенной (если Вселенная действительно бесконечна); она имеется в бесконечном количестве и в каждом кубическом сантиметре пространства. Причем это не только где-то очень далеко от нас в глубинах Вселенной, а просто везде и всюду, и в частности, в комнате, где находится сейчас наш читатель.

Ясно, что это бессмысленная бесконечность, и если бы теоретики умели правильно вычислять энергию вакуума, она получилась бы у них не бесконечной, а вполне конечной, и скорее всего довольно малой. То есть такой, какой эту вакуумную энергию недавно обнаружили и измерили астрономы-наблюдатели. Неожиданным образом вакуум проявил себя в астрономических наблюдениях своим ... антитяготением.

Что это такое – антитяготение? Все тела природы притягиваются друг к другу силой взаимного притяжения. Сила взаимного тяготения двух тел пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Таков всем знакомый закон всемирного тяготения Ньютона. Он действует и на Земле, и в Солнечной системе, и во всей Вселенной, отчего ньютоновское тяготение и называют всемирным.

Что же касается антитяготения, то оно, как выяснилось, тоже существует в природе, но заметно только в больших, космических масштабах. Астрономы обнаружили, что оно заставляет галактики и системы галактики удаляться друг от друга с возрастающей скоростью. Это самое крупное открытие в космологии, а возможно в естествознании вообще, за последние годы. К этому успеху вела нелегкая дорога гипотез, сомнений и поисков.

О вакууме, о его энергии и о создаваемом им антитяготении пойдет далее речь в этой статье.

### ***Краткая история космологии***

Космология берет начало в первые десятилетия XX века. То была особая эпоха в истории науки. Тогда были созданы теория относительности и квантовая механика, составляющие с тех пор фундамент всей физики. Космология начиналась с первых теоретических поисков, которые почти всем казались поначалу совершенно абстрактными и произвольными, если не фантастическими. Затем последовали грандиозные наблюдательные открытия, и в результате в космологии возникла новая, богатая содержанием и хорошо обоснованная картина мира как единого целого.

История космологии складывается, если говорить совсем коротко, из четырех крупнейших событий. Это открытия, которые и определили лицо науки о Вселенной к началу XXI века.

Первое из трех важнейших открытий сделано Эдвином Хабблом в 1929 году. Он обнаружил разбегание галактик, которое теперь понимают как всеобщее расширение Вселенной. Вскоре после этого, в 1933 году, Фриц Цвикки заметил признаки существования во Вселенной темной материи, которую называют еще и скрытыми массами. Третье событие – регистрация реликтового излучения, равномерно заполняющего всё пространство мира; это было сделано в 1965 г. Арно Пензиасом и Робертом Вилсоном (Нобелевская премия 1986 г.). Наконец, четвертое и самое свежее событие – открытие всемирного антитяготения двумя группами астрономов; оно произошло совсем недавно, в 1998–99 годах.

Замечательно, что три из четырех крупнейших наблюдательных открытий были заранее предсказаны теоретиками. Расширение Вселенной было предсказано Александром Александровичем Фридманом в 1922 году. Реликтовое излучение тоже было предсказано – это заслуга Георгия Антоновича Гамова (1940–50-е годы), некогда студента профессора Фридмана в Ленинградском университете. Существование же всемирного антитяготения предвидел Эйнштейн (1917 г.). Только темная материя явилась в космологию неожиданно – о ее существовании никто заранее не подозревал.

Предсказание Эйнштейна дольше всего ждало своего наблюдательного подтверждения. И вот это наконец произошло. Как и полагается в истории самых важных открытий, оно оказалось сюрпризом почти для всех, а некоторых теоретиков и вовсе застало врасплох. Никто не мог представить себе, что судьбу эйнштейновской идеи удастся выяснить уже сейчас и притом с такой высокой степенью определенности и надежности.

### *Гипотеза Эйнштейна*

В 1915 году Эйнштейн создал общую теорию относительности. Два года позднее он сделал попытку применить ее к изучению мира, рассматриваемого как некое единое целое. Новая теория впервые позволила поставить столь дерзкую цель в качестве точно формулируемой и притом строго решаемой научной задачи. Эйнштейн решил эту задачу и представил результат в виде физико-математической модели Вселенной. Модель описывала Вселенную как статическую, вечную и неизменную физическую систему. Во Вселенной Эйнштейна притяжение всех тел природы друг к другу... отсутствовало. Ньютоновское всемирное тяготение при этом, однако, не отменялось; но помимо него в эйнштейновской модели действовал еще один силовой фактор – всемирное антитяготение, которое полностью компенсировало взаимное тяготение космических тел в масштабе всей Вселенной.

Ничего подобного прежняя, до-эйнштейновская физика не знала. Но антитяготение не вытекало в действительности и из общей теории относительности. Это была совершенно новая идея. Она органично и в исключительно экономной форме была введена в структуру общей теории относительности, в ее математические уравнения.

Антитяготение было представлено в этих уравнениях всего одной и притом постоянной физической величиной, одним числом, которое получило позднее название космологической константы.

Космологическая константа, обозначаемая греческой буквой  $\Lambda$  (лямбда), обеспечивала в модели Эйнштейна компенсацию всемирного тяготения – без нее теория не допускала бы статичности мира.

Последнее понятно: в мире, где безраздельно господствует одно лишь всемирное тяготение, все тела должны «падать», двигаясь под действием взаимного притяжения. Статичность, покой и вечная неизменность в таком случае совершенно невозможны.

События в космологии тех лет развивались стремительно. В 1922 году Фридман доказал, что уравнения общей теории относительности – даже при наличии в них космологической константы – допускают не только статические модели, но и модели динамические, в которых Вселенная как целое могла расширяться или сжиматься. Фридман явно предпочитал модель расширяющейся Вселенной. Она и подтвердилась в 1929 году в астрономических наблюдениях Хаббла.

Как только стало ясно, что во Вселенной никакого покоя на самом деле нет, многие сочли, что идея всемирного антитяготения провалилась, а в космологической константе нет нужды. Так считал и сам Эйнштейн, который однажды в разговоре с Гамовым назвал идею космологической константы своим самым досадным промахом в науке. Против этой идеи были и другие теоретики, среди них Л.Д. Ландау и В. Паули. Об умонастроении Ландау в 1950–60 годах пишет В.Л. Гинзбург: *«Л.Д. Ландау даже слышать не хотел о  $\Lambda$ -члене, но добиться от него причины такой позиции мне не удалось»*.

И тем не менее интерес к гипотезе Эйнштейна не пропадал совсем. Десятилетие за десятилетием, начиная с работ В. де Ситтера и Ж.Леметра, складывалось понимание того, что же в сущности стоит за этой новой константой природы, – если только она не равна нулю. В результате возникло представление, что космологическая константа Эйнштейна описывает некую новую, совсем необычную космическую среду. Эта среда, не известная до того ни в

теории, ни в эксперименте, заполняет всё пространство мира с всюду и всегда одинаковой плотностью. Она действует на погруженные в нее космические тела так, что их взаимное притяжение может быть ослаблено или даже полностью устранено – как в космологической модели Эйнштейна. Более того, эта среда способна не только скомпенсировать всемирное тяготение, но и пересилить его, заставить тела не притягиваться друг к другу, а удаляться друг от друга. Такая точка зрения была впервые высказана Эрастом Борисовичем Глинером в 1965 году. Сейчас она получила самое широкое распространение.

Антигравитирующую космическую среду мы называем вакуумом Эйнштейна–Глинера. И, как уже сказано, вакуум – это отнюдь не пустота. У вакуума есть энергия, и эта энергия обладает постоянной во времени и всюду одинаковой в пространстве плотностью – и притом в любой системе отсчета. Этим вакуум принципиально отличается от всех других форм космической среды, плотность которых неоднородна в пространстве, падает со временем в ходе космологического расширения и может быть разной в разных системах отсчета.

### **Открытие антитяготения**

В 1998–99 годах две группы астрономов-наблюдателей сообщили об открытии всемирного антитяготения. В работе участвовало большое число исследователей (около ста в общей сложности), одной группой руководил Адам Райес, другой – Сол Перлмуттер. Астрономы обнаружили, что в наблюдаемой Вселенной присутствует вакуум, – скорее всего, именно тот вакуум Эйнштейна–Глинера, который математически описывается космологической константой. Оказалось, что по плотности энергии он превосходит все обычные формы космического вещества вместе взятые. Вакуум создает космическое антитяготение, которое не то что компенсирует всемирное тяготение, но определенно пересиливает его и почти безраздельно управляет динамикой космологического расширения в современную эпоху.

Открытие сделано на основании изучения далеких вспышек сверхновых звезд. Из-за их исключительной яркости, сверхновые можно наблюдать на очень больших, по-настоящему космологических расстояниях. Опуская другие детали, скажем, что использовались данные о сверхновых определенного типа (Ia), которые принято считать «стандартными свечами»; их собственная светимость в максимуме блеска действительно лежит в довольно узких пределах (эксперты по сверхновым продолжают между тем спорить, в каких именно). Это позволяет проследить, как видимая, регистрируемая яркость источников зависит от расстояния до них. Конечно, на небольших расстояниях это классический закон обратных квадратов; но на очень большом удалении источников становятся существенными космологические эффекты, и, значит, характер этой зависимости позволяет в принципе узнать нечто новое о всей Вселенной.

Одно плохо со сверхновыми – этих звезд очень мало. В среднем на обычную галактику приходится одна вспышка сверхновой за примерно сто лет, да и длится эта вспышка всего несколько месяцев, а то и недель. Поэтому статистика космологических сверхновых не очень пока богата (четыре десятка звезд к 2005 году).

Первая группа наблюдателей, сообщившая о своих результатах в 1998 году, располагала данными о всего нескольких сверхновых нужного типа на нужных расстояниях; но уже и этого было достаточно, чтобы заметить космологический эффект в законе убывания видимой яркости с расстоянием. Оказалось, что убывание яркости происходит несколько быстрее, в среднем, чем этого следовало бы ожидать по космологической теории, которая до того считалась стандартной. Но это возможно тогда (и, как все сейчас думают, только тогда), когда космологическое расширение происходит с ускорением, т.е. когда скорость удаления от нас источника света не убывает, а возрастает со временем. Ускорение же может создать только космический вакуум: его антитяготение стремится удалить тела друг от друга и тем самым подгоняет разлет галактик и скоплений.

Именно благодаря этому эффекту ускорения и удалось распознать космический вакуум и даже весьма точно измерить плотность его энергии. Оказалось, что плотность энергии вакуума составляет  $7 \times 10^{-30}$  г/см<sup>3</sup>, если выразить ее в единицах плотности массы. (Как известно, масса и энергия связаны между собой знаменитой формулой  $E = mc^2$ ; чтобы пересчитать плотность массы на плотность энергии, нужно умножить ее на  $c^2$ .) Эта плотность заметно больше плотности других видов космического вещества и энергии.

Энергия вакуума составляет приблизительно 70 процентов от полной энергии (или массы) Вселенной. При этом на темное вещество приходится 25 процентов, на обычное вещество из протонов, нейтронов и электронов – 4 процента, а вклад реликтового излучения меньше одного процента.

Напомним, что темное вещество – это холодный (нерелятивистский) газ элементарных частиц, природа которых пока не установлена. Их не удавалось до сих пор «поймать» и изучить в лаборатории. Но точно известно, что это не те частицы (протоны, нейтроны, электроны), из которых состоит обычное вещество. Частицы темного вещества не имеют электрического заряда, они не излучают света и потому невидимы; они вообще не участвуют в электромагнитном взаимодействии. Предполагается, что они способны участвовать в слабом взаимодействии (ответственном, например, за бета-распад атомных ядер); они подвержены также взаимному притяжению и подчиняются закону всемирного тяготения Ньютона. Темного вещества во Вселенной приблизительно в 6 раз больше по массе, чем обычного вещества.

Суммарная плотность вакуума и трех других компонент космической среды точно (или почти точно) равна так называемой критической плотности: это означает, согласно теории Фридмана, что трехмерное пространство расширяющейся Вселенной является плоским, евклидовым (или очень близким к нему). Все эти данные были подтверждены позднее другими астрономическими наблюдениями и сейчас считаются надежно установленными.

Для антигяготеющей среды, после того как она была открыта, стали придумывать новые названия. Одно из них – темная энергия – получила некоторое распространение. Под нею понимают, вообще говоря, не вакуум Эйнштейна–Глинера (о свойствах которого далее будет подробно рассказано), а любую мыслимую среду, способную создавать антигяготение. И вакуум, и эта гипотетическая среда действительно являются темными в том смысле, что они невидимы, не излучают и не отражают света. В последнее время наблюдательные данные всё более определенно указывают на то, что антигяготеющая среда – это именно вакуум Эйнштейна–Глинера (описываемый космологической константой), а не что-либо еще.

## ***Почему «анти»***

Почему же вакуум создает не тяготение, а антигяготение? Всё дело в том, что вакуум Эйнштейна–Глинера обладает не только определенной плотностью, но также и давлением. Так он с самого начала задан и описан космологической константой. При этом, если плотность вакуума положительна, то его давление отрицательно. Отрицательное давление – не вполне обычное явление в физике. При «нормальных условиях» давление в «нормальной» жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды), и в твердых телах (например, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление тоже может возникать. Это требует особых, специальных условий, но само по себе не является чем-то исключительным.

Однако в случае вакуума ситуация совсем особая. Давление вакуума не только отрицательно, оно к тому же равно – по абсолютной величине – его плотности энергии (напомним, что эти две физические величины имеют одинаковую размерность). То есть, давление вакуума есть минус плотность энергии. Ничего подобного нет ни в одной другой среде. Это абсолютно и исключительно свойство одного вакуума, и только его. Это и только это соотношение между плотностью и давлением совместимо с понятием вакуума как формы энергии с всюду и всегда постоянной плотностью, независимо от системы отсчета.

Согласно общей теории относительности, тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением. При этом «эффективная» плотность энергии, создающая тяготение, складывается из суммы двух слагаемых: плотности энергии и трех величин давления. Но при указанной связи между давлением и плотностью энергии вакуума такая сумма составляет две величины давления и поэтому оказывается отрицательной. Отсюда и антигяготение вакуума: отрицательная эффективная плотность создает «отрицательное» тяготение.

По наблюдательным данным о сверхновых, о которых мы упоминали, плотность вакуума превышает суммарную плотность всех остальных видов космической энергии. Поэтому в наблюдаемой Вселенной антигяготение сильнее тяготения, и космологическое расширение обязано происходить с ускорением.

## ***Ускоренное расширение***

В отличие от всемирного тяготения, всемирное антитяготение стремится не сблизить тела, а, напротив, удалить их друг от друга. Если, например, имеются два тела на фоне вакуума, то вакуум заставляет их двигаться в противоположных направлениях. Так что если эти тела в какой-то момент покоились друг относительно друга, то в следующий момент они начинают двигаться прочь друг от друга.

При общем космологическом расширении наблюдаемые скорости разбегающихся галактик тоже приводят к их удалению друг от друга. Это означает, что действующая на них сила антитяготения направлена вдоль их скорости, и потому она помогает галактикам разбегаться, всё время увеличивая их относительную скорость.

Раз наблюдаемое расширение Вселенной происходит с ускорением, оно будет продолжаться неограниченно долго – ничто уже не способно этому помешать. Действительно, средняя плотность вещества и излучения будет при расширении только убывать. Но это означает, что создаваемое ими тяготение никогда уже не будет преобладать во Вселенной. Динамическое доминирование вакуума будет только усиливаться, а разбегание галактик будет происходить всё быстрее и быстрее.

Обратимся теперь не к будущему, а к прошлому Вселенной. Вакуум доминировал в мире не всегда. Его плотность не меняется со временем, тогда как плотность темного вещества падает при расширении мира и, значит, растет назад в прошлое. Всё это означает, что антитяготение вакуума было несущественно в достаточно отдаленном прошлом. В ранней Вселенной господствовало всемирное тяготение не-вакуумных компонент космической среды. Оно замедляло космологическое расширение. А эпоха антитяготения и ускоренного расширения наступила только при возрасте мира в 6–8 миллиардов лет. Это приблизительно половина от современного возраста Вселенной, который составляет около 14 миллиардов лет.

Но если в ранней истории Вселенной космологическое расширение происходило с торможением, точные измерения ускорения по сверхновым звездам должны прямо на это указать. Если только удастся найти сверхновые, находящиеся от нас на расстоянии в 6–8 и более миллиардов световых лет. Замечательно, что такие примеры очень далеких сверхновых в самое последнее время были найдены, и они определенно подтверждают, что в далеком прошлом расширение действительно происходило не с ускорением, а с замедлением. Вместе с тем эти примеры служат, очевидно, веским дополнительным аргументом в пользу всей новой картины эволюции Вселенной, которая возникла благодаря открытию космического вакуума.

## ***Три массы вакуума***

Как известно, пространство вместе со временем образуют единое многообразие, четырехмерное пространство-время, в котором три координаты относятся к собственно пространству, а четвертая координата есть время. Именно так описывает мир теория относительности. Согласно этой теории, геометрия четырехмерного пространства-времени определяется распределением и движением вещества. Вещество распределено в пространстве и движется во времени. Связь между веществом и пространством-временем осуществляет тяготение вещества. Связь эта взаимная: не только вещество влияет на геометрию пространства-времени, но и пространство-время способно влиять на распределение и движение вещества в нем.

Но вакуум, и только он один, способен влиять, но не испытывать на себе обратного влияния. Действительно, тот факт, что плотность и давление вакуума неизменны, означает, что на вакуум ничто, нигде и никогда никак не действует. Он воздействует на вещество своим антитяготением, он влияет на свойства пространства-времени. И даже полностью их определяет, когда его плотность превышает суммарную плотность всех остальных видов космической энергии. А сам не испытывает ни обратного влияния всего вещества мира, ни обратного влияния геометрии мира, ни своего собственного антитяготения. Он оказывает действие, но не испытывает противодействия. Это единственный известный в физике пример, когда действие не равно противодействию, – вопреки третьему закону Ньютона. Причина такой «неподатливости» вакуума состоит в том, что у него нет инертной массы; вернее, она равна нулю. Инертная масса – это понятие из второго закона Ньютона, который гласит, что сила, действующая на тело, равна произведению ускорения на массу тела.

Здесь имеется в виду именно инертная масса. Для всех обычных тел она отлична от нуля. Инертная масса единицы объема тела равна – по общему определению – сумме плотности энергии тела и давления в нем, деленной на квадрат скорости света. Но как мы помним, давление вакуума есть минус его плотность энергии. Из этого вытекает, что сумма, дающая инертную массу, обращается для вакуума в нуль. Но тогда выходит, что любая сила, приложенная к вакууму, тоже равна нулю.

В физике известен и еще один род массы – это пассивная гравитационная масса. Она фигурирует в законе тяготения Ньютона. Это масса, которая «чувствует» поле тяготения, создаваемое всеми остальными телами. Еще Галилею было известно, что пассивная гравитационная масса всегда равна инертной массе. Именно поэтому все тела движутся с одинаковым ускорением в поле тяготения Земли. Равенство этих двух масс составляет содержание универсального принципа эквивалентности, который действует в механике Ньютона и полностью сохраняет свою силу в общей теории относительности. Применительно к вакууму эквивалентность означает, что его пассивная гравитационная масса равна нулю, как и его инертная масса. Поэтому вакуум – и только он один – не «замечает» никаких полей тяготения, ни чужих, ни своего собственного.

Мы уже упоминали выше об эффективной гравитирующей плотности. Ей отвечает масса третьего рода, которая называется активной гравитационной массой, т.е. массой, не чувствующей, а создающей тяготение. Эффективная плотность – это активная масса, приходящаяся на единицу объема. Как мы знаем, для вакуума эффективная плотность отрицательна. Значит, и активная гравитирующая масса вакуума отлична от нуля и отрицательна. Для обычных тел вокруг нас все три рода массы одинаковы и неразличимы, так что можно говорить просто о массе тела во всех трех случаях.

### *Мир антитяготения*

Что же происходит с пространством-временем мира, когда в нем начинает доминировать вакуум? Если пренебречь влиянием всего не-вакуумного вещества, то только вакуум и будет определять тогда свойства пространства-времени. Как мы знаем, плотность и давление вакуума не меняются со временем. С вакуумом вообще ничего не происходит, он всюду и всегда один и тот же. Но раз неизменный вакуум и только он определяет свойства пространства-времени, то и само пространство-время всюду и всегда должно быть одним и тем же. Это означает, что мир, в котором безраздельно господствует вакуум, должен быть неизменным во времени, статичным. В полном соответствии с этим рассуждением космологическая теория Фридмана (а в ней с самого начала учитывалась возможность существования вакуума, представляемого космологической константой) описывает мир вакуума как мир статичный и неизменный. Но каким образом происходит это превращение мира подвижного и расширяющегося в мир неподвижный? Как из мира исчезает эволюция? Ведь разбегание галактик в нем продолжается... Да, галактики удаляются друг от друга в мире вакуума, и притом со всё возрастающими скоростями. Но чем быстрее они разбегаются, тем меньше плотность их общего распределения, и, значит, тем слабее их влияние – через их собственное тяготение – на свойства пространства-времени. А влияние вакуума – через его антитяготение – становится тем временем всё более и более сильным. В итоге галактики, да и вообще всё не-вакуумное вещество, оказываются в мире, свойства которого как целого определяются не ими, а вакуумом. Так эволюция мира в целом затухает, его пространственно-временной каркас застывает и остается «замороженным» навсегда. Можно сказать, что чем сильнее разгоняется космологическое расширение под воздействием антитяготеющего вакуума, тем ближе наш четырехмерный мир к абсолютной статике, неизменности и полному покою.

В таком мире все события, т.е. четырехмерные точки, неразличимы, а это означает, что в нем нигде ничего не происходит, и потому этот мир вечен и неизменен как целое. Такой мир напоминает статический мир модели Эйнштейна. Но в модели Эйнштейна покой достигался равновесием тяготения вещества и антитяготения вакуума. В мире вакуума такого равновесия нет: антитяготение вакуума ничем не уравновешено и тем не менее этот мир тоже находится в покое.

Оказывается, что покой не обязательно предполагает равновесие сил – если речь идет о вакууме, это необязательно. Будучи сам неизменным, он делает и мир неизменным – в отсутствие других сил.

### *И снова об энергии вакуума*

О свойствах вакуума Эйнштейна–Глинера, о всемирном антитяготении можно было бы и еще немало рассказать. Но пора, кажется, задать главный вопрос:

Что же такое вакуум Эйнштейна–Глинера с точки зрения фундаментальной физики? Из чего он состоит? Какова его микроскопическая структура? Приходится сразу признать: об этом ничего достоверно пока не известно. Распространенная точка зрения такова, что хотя новая-выявленный вакуум и называют космическим, это тот же вакуум, что и в атомной физике и микрофизике, где он давно известен. В физическом вакууме разыгрываются взаимодействия элементарных частиц. Физический вакуум представляет собой (как уже сказано) наинизшее энергетическое состояние квантовых полей. Физический вакуум непосредственно проявляется экспериментально. В экспериментах его присутствие несомненно; но при этом плотность энергии вакуума ускользает от измерения. Последнее далеко не случайно. Принципиальное обстоятельство состоит в том, что во всех – кроме тяготения – физических взаимодействиях проявляется только разность энергий физической системы в различные моменты времени и/или в различных точках пространства. Но не вся величина энергии в данном состоянии физической системы. Лишь тяготение (гравитация – его синоним) реагирует на саму энергию целиком, всю ее, а не на ее разности.

Но если не учитывается гравитация, то и само понятие энергии оказывается в теории неполным. Дело в том, что без гравитации уровень, от которого отсчитывается энергия, остается произвольным. Но это ничему не мешает. Что принять за нулевой уровень энергии? Да что хотите, если у вас не рассматривается тяготение. При этом результат расчета любых измеряемых физических величин не должен зависеть от принятой калибровки энергии.

Так и обстоят дела в электродинамике и физике ядерных взаимодействий (сильного взаимодействия и слабого). Это относится также и к вычислению энергии вакуума. То обстоятельство, что при расчетах вакуума в квантовых полях его плотность энергии формально оказывается бесконечной, никого не пугает – эту бесконечность можно приравнять нулю, то есть выбрать ее за уровень, от которого отсчитывается энергия.

Но когда на сцену выходит тяготение, неполнота теории немедленно обнаруживается. Гравитация чувствует всю энергию, как мы сказали. Поэтому нулевой уровень энергии оказывается в этом случае не условным, а безусловным и абсолютным. От него и нужно отсчитывать все энергии, и в том числе энергию физического вакуума. Однако теория не говорит нам, как это следует сделать. Фундаментальная теория не смогла предсказать значение плотности космического вакуума. Даже сейчас, когда величина плотности уже измерена астрономами, теория не в состоянии вычислить ее значение «из первых принципов». Это не случайное обстоятельство, причина кроется в нынешнем состоянии фундаментальной физики.

За фундаментальной физикой значатся грандиозные успехи. Но чтобы справиться с проблемой вакуума, требуется такая теория, которая объединила бы квантовые законы с законами тяготения. Тогда полная энергия вакуума квантовых полей (а не только ее разности) приобрела бы точный физический смысл, а потому и ее плотность поддалась бы вычислению. Но такой теории сейчас нет; лишь отдельные ее ростки пробиваются на той почве, где квантовая теория соприкасается с космологией, с физикой гравитационных волн и физикой черных дыр. Прошло почти сто лет со времени создания квантовой механики и общей теории относительности, а синтез этих теорий – мечта Эйнштейна и теоретиков многих поколений – остается пока делом не слишком определенного будущего. Возможно, это самая острая задача физики и космологии на XXI век.