

УДК 573.52 (15)

Я

И

М

И

Х

© Горшков В.К., Мансуров Г.Н., 2012

ТЕОРИЯ ИНФЛЯЦИИ. СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Аннотация. С позиций инфляционной космологии рассмотрена современная теория космической эволюции для ранней Вселенной от первых мгновений до начала Большого взрыва. Показано, что инфляция характеризует стадию стремительного экспоненциального расширения Вселенной, заканчивающуюся Большим взрывом. Дана краткая характеристика теории струн как существенного этапа в решении вопроса о создании единой теории четырех видов взаимодействия (гравитационного, сильного, слабого и электромагнитного). Ставится вопрос о фундаментальности понятий пространства и времени и о природе стрелы времени.

Ключевые слова: инфляционная космология, теория инфляции, сингулярный взрыв, планковская энергия, инфлатон, теория струн, природа пространства, времени и стрелы времени.

© V. Gorshkov, G. Mansurov, 2012

THE INFLATION THEORY. TIME ARROW

Abstract. The Modern theory of space evolution for early Universe (from the first instants to the beginning of Big Bang) is revealed from the point of view of inflationary cosmology. It is shown that the stage of an impetuous exponential expansion of the Universe resulting with Big Bang is characterized by inflation. The article gives a short description of the Theory of Strings as an essential stage in solution of the problem connected with the creation of an integrated theory of four kinds of interaction (gravitational, strong, weak and electromagnetic). The article highlights the problem of a fundamental nature of Space, Time and Time Arrow.

Key words: inflationary cosmology, the inflation theory, singular explosion, Planck energy, inflaton, the Theory of Strings, the nature of Space, Time and Time Arrow.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ

До недавнего времени стандартная космологическая модель рассматривалась как основная теория происхождения Вселенной. Современная теория сотворения мира возникла примерно через пятнадцать лет после создания Эйнштейном общей теории относительности. Хотя сам Эйнштейн отказался посмотреть правде в глаза и признать, что из его теории следует невозможность существования вечной и статической Вселенной, за него это сделал Александр Фридман. Он нашел так называемое решение Большого взрыва для уравнений, т. е. решение, в котором Вселенная развивается из начального состояния бесконечного сжатия и в настоящий момент находится в стадии расширения после этого исходного взрыва. Эйнштейн был так уверен в невозможности подобных меняющихся во времени решений его уравнений, что даже опубликовал короткую статью о якобы найденной им грубой ошибке в работе Фридмана. Однако примерно через восемь месяцев Фридману все же удалось убедить Эйнштейна в том, что в действительности никакой ошибки не было; Эйнштейн публично, но кратко, снял свои возражения. Очевидно, однако, что Эйнштейн не считал результаты Фридмана имеющими какое-либо

отношение к нашей Вселенной. Однако пять лет спустя кропотливые наблюдения Хаббла за несколькими десятками галактик, проводившиеся с помощью стоудеймового телескопа в обсерватории Маунт Вильсон, показали, что Вселенная действительно расширяется. Работа Фридмана до сих пор является основой современной космологии.

Подробнее современная теория космической эволюции выглядит так. Около 14 миллиардов лет назад Вселенная изверглась в результате мощного сингулярного взрыва, разметавшего в стороны все пространство и материю. Вычисления температуры, которая была у Вселенной лишь спустя 10^{-43} с после Большого взрыва (так называемое планковское время), приводят к значению порядка 10^{32} К, что примерно в 10^{25} раз выше температуры в недрах Солнца. С течением времени Вселенная расширялась и охлаждалась, и в ходе этого процесса в первоначально однородной и горячей первичной космической плазме стали возникать вихри и скопления. Через 10^{-5} с после Большого взрыва Вселенная достаточно охладилась (примерно до 10^{13} К, что в миллион раз больше температуры внутри Солнца) для того, чтобы из групп трех кварков стало возможно образование протонов и нейтронов. Примерно через сотую долю секунды условия стали такими, что в охлаждающейся плазме элементарных частиц уже могли формироваться ядра некоторых легких элементов периодической таблицы. В течение следующих трех минут, пока кипящая Вселенная охлаждалась примерно до 10^9 К, основная доля образовавшихся ядер приходилась на ядра водорода и гелия и включала небольшую добавку дейтерия («тяжелого» водорода) и лития. Этот интервал времени получил название периода первичного нуклеосинтеза.

Затем в течение нескольких сотен тысяч лет было мало событий, кроме дальнейшего расширения и охлаждения. Но в конце этого этапа, когда температура упала до нескольких тысяч градусов, летавшие до этого с бешеной скоростью электроны замедлились до скорости, позволяющей атомным ядрам (в основном, ядрам водорода и гелия) захватывать их, образуя электрически нейтральные атомы. Это явилось поворотным моментом: начиная с него Вселенная, в общем и целом, становится прозрачной. До эры захвата электронов она была заполнена плотной плазмой электрически заряженных частиц, одни из которых (например, ядра) несли положительный заряд, а другие (например, электроны) — отрицательный. Фотоны, взаимодействующие лишь с заряженными частицами, испытывали постоянные пинки и толчки со стороны кишаших заряженных частиц и не могли пролететь достаточно далеко, не будучи отклоненными или поглощенными этими частицами. Из-за таких препятствий свободному движению фотонов Вселенная предстала бы перед наблюдателем совершенно непрозрачной, подобной густому утреннему туману или снежной буре. Но когда отрицательно заряженные электроны были рассажены по орбитам вокруг положительно заряженных ядер и образовались электрически нейтральные атомы, препятствия исчезли и густой туман рассеялся. С этого момента фотоны от Большого взрыва стали свободно путешествовать по Вселенной, и постепенно она стала полностью доступной взору.

Примерно миллиард лет спустя, когда Вселенная достаточно успокоилась после неистового начала, из сжатых гравитацией комков первичных элементов стали формироваться галактики, звезды, а затем и планеты. Однако теория Большого взрыва не содержит самого взрыва, определяющего физику формирования Вселенной. Его возникновение объясняет *теория инфляции* [4].

После объединения электронов и ядер в атомы фотоны могут беспрепятственно путешествовать во Вселенной. Это означает, что Вселенная заполнена «газом» фотонов, движущихся во всевозможных направлениях и равномерно распределенных в космическом пространстве. Когда Вселенная расширяется, газ свободно летящих фотонов расширяется вместе с ней, так как Вселенная, по существу, является резервуаром для этого газа. Подобно тому, как температуры более привычных для нас газов понижаются при расширении, температура этого фотонного газа тоже падает при расширении Вселенной.

Уже давно, после работ Георгия Гамова в 1950-х гг. [2], физики поняли, что современная Вселенная должна быть наполнена почти однородным составом из первичных фотонов, охладившихся до нескольких градусов выше абсолютного нуля за 14 миллиардов лет космического расширения. В 1965 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон из Лаборатории им. Белла в штате Нью-Джерси случайно сделали одно из важнейших открытий нашей эпохи. Работая с антенной, предназначенной для спутниковой связи, они зарегистрировали послесвечение Большого взрыва! Позднее и теория, и эксперимент были усовершенствованы, и эти исследования завершились измерениями, полученными с помощью спутника COBE (Cosmic Background Explorer, «зонда космического фона») агентства NASA в 1990-е гг. На основе полученных данных физики и астрономы точно установили, что Вселенная действительно заполнена микроволновым излучением с температурой примерно на 2,7K выше абсолютного нуля, что в точности совпадает с предсказаниями теории Большого взрыва. Более точно, в каждом кубическом метре Вселенной находится около 400 миллионов фотонов, образующих огромное космическое море микроволнового излучения — эхо сотворения.

Все данные, которыми мы располагаем, подтверждают космологическую теорию, описывающую эволюцию Вселенной от сотых долей секунды после Большого взрыва до настоящего времени. Однако не следует забывать о том, что новорожденная Вселенная развивалась с феноменальной скоростью. Мельчайшие доли секунды, гораздо меньшие сотых долей, суть космические эпохи, в течение которых формировались кажущиеся нам неизменными свойства окружающего мира. Квантовая теория поля точечных частиц справедлива лишь тогда, когда средние энергии частиц не превышают планковскую энергию. С точки зрения космологии, этот предел соответствует моменту, когда вся окружающая нас Вселенная была сжата до размера мельчайшего зерна планковских размеров, а плотность была так высока, что сложно подобрать подходящую метафору, которая проиллюстрировала бы эту ситуацию: плотность Вселенной в эти моменты времени была просто колоссальной. При таких энергиях и плотностях гравитация и квантовая теория уже не могут рассматриваться как две различные сущности, каковыми они являлись в квантовой теории поля точечных частиц. Именно *теория струн* дает основание для устранения противоречия между общей теорией относительности и квантовой механикой и создания квантовой гравитации. На временной шкале такие энергии и плотности соответствуют точкам, удаленным от Большого взрыва менее чем на планковское время 10^{-43} с, следовательно, эта сверхранняя эпоха является космологической ареной теории струн. В раскаленной среде ранней Вселенной три негравитационных взаимодействия оказываются связанными воедино. Расчеты зависимости силы этих взаимодействий от энергии и температуры показывают, что до моментов примерно через 10^{-35} с после Большого взрыва сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия были одним «великим объединенным» взаимодействием [1].

Процессы в сверхранней Вселенной, связанные с возникновением пространства и времени, рассматриваются в теории инфляции.

ТЕОРИЯ ИНФЛЯЦИИ. СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Теория инфляции исходит из существования в бесконечной Вселенной не равной нулю вероятности *флуктуации к низкой энтропии*. Малая флуктуация — вполне обычный скачок к подходящим условиям в крошечном клочке пространства — сразу и неизбежно дает гигантскую и упорядоченную Вселенную, которую мы знаем. Скачок к более низкой энтропии внутри ультрамикроскопического кусочка пространства был использован для инфляционного расширения в широчайшие просторы космоса.

Кусочку пространства необходимо быть исключительно маленьким — порядка 10^{-26} см в поперечнике — чтобы инициировать космологическое расширение, которое растянет этот кусочек до величины больше, чем Вселенная, которую мы видим. Возможны разные виды флуктуаций поля инфлатона. Поле инфлатона — это особое поле Хиггса, характерное для Вселенной в начальный момент существования до Большого взрыва, когда Вселенная была чудовищно плотной и носителем ее энергии было поле Хиггса в состоянии, далеком от минимума потенциальной энергии. (Поле Хиггса — это поле, которое заполняет все пространство, даже самое «пустое»!). Отрицательное давление поля инфлатона генерировало гигантское гравитационное отталкивание, которое разносило каждую область пространства прочь от любой другой. Это и принято называть инфляцией, которая продолжалась $\sim 10^{-35}$ с. За это время объем Вселенной мог возрасти до 10^{90} раз, что вполне можно назвать инфляционным взрывом. В большинстве случаев флуктуации не будут пригодны для начала инфляции. Но имеет значение то, чтобы был один кусочек, который привел бы к разглаживающему пространству инфляционному взрыву, ставшему первым звеном в низкоэнтропийной цепочке, ведущей к нашему космосу [3].

Инфляционная космология задает направление стреле времени, исходя из предположения возможности возникновения состояния в прошлом с чрезвычайно низкой гравитационной энтропией; будущее является направлением, в котором эта энтропия возрастает.

Результат инфляции — однородное расширение пространства, заполненного почти однородно распределенной материей. Это та низкоэнтропийная конфигурация, которая нужна для объяснения *стрелы времени, направленной в сторону возрастания энтропии*.

В начале инфляции полю инфлатона не нужно иметь много энергии, поскольку огромное расширение, порожденное инфлатоном, гигантски *увеличит заключенную в нем энергию*. Крохотный кусочек (10^{-26} см) пространства, заложенный однородным полем инфлатона, в ходе инфляционного расширения приобретает такое количество энергии, которого хватит на всю нашу Вселенную. Инфляционное расширение растягивает мелкую неоднородную квантовую рябь и делает ее ясно видимой на небе в виде галактик: «Согласно инфляционной теории более чем 100 млрд. галактик, сияющих в пространстве как небесные бриллианты, являются не чем иным, как росписью квантовой механики. По моему мнению, осознание этого является одним из величайших чудес современной научной эпохи» [3].

Расчеты, проделанные сегодня на основании инфляционной схемы, способны объяснить картину ничтожных температурных вариаций — вариаций, возникших около 14 млрд. лет назад, — и ключом к этому объяснению является дрожь, возникающая из квантовой неопределенности. Этот успех убеждает многих физиков в правильности инфляционной теории.

Тот факт, что астрономические наблюдения, которые стали возможными совсем недавно, позволили космологии перейти из области спекуляций и предположений в область, основанную на наблюдениях, дает основание назвать наше время *золотым веком космологии*.

Инфляционная теория утверждает, что материя и излучение возникли в конце инфляционной фазы, когда поле инфлатона выделило заключающуюся в нем энергию, скатившись с возвышения на дно своей чаши потенциальной энергии.

Может ли теория существованием инфлатона в тот момент, когда инфляция подошла к концу, объяснить столь громадное количество материи/энергии, содержащееся в современной Вселенной? Оказывается, инфляция может легко это сделать. Дело в том, что поле инфлатона является гравитационным паразитом — оно питается гравитацией, — так что полная энергия поля инфлатона возрастает по мере того как пространство расширяется. Математика показывает, что плотность энергии поля инфлатона остается по-

стоянной в течение фазы быстрого инфляционного расширения, поскольку заключенная в нем полная энергия растет прямо пропорционально объему пространства.

Размер Вселенной в ходе инфляции возрастает как минимум в 10^{30} раз, т. е. объем — в 10^{90} раз. Значит энергия, заключенная в поле инфлатона, возрастает также в 10^{90} раз к концу инфляционной фазы примерно через 10^{-35} с после ее начала. Это значит, что в начале инфляции полю инфлатона не нужно иметь много энергии, поскольку гигантское расширение, порожденное инфлатоном, увеличит, соответственно, заключенную в нем энергию. Расчет показывает, что крохотный кусочек пространства $\sim 10^{-26}$ см в поперечнике, заполненный однородным полем инфлатона весом ~ 10 кг, в ходе последующего инфляционного расширения приобретает такое количество энергии, которого хватает на всю нашу Вселенную. Остается объяснить, почему имелся инфлатон и само пространство, которое он занимал!

В полной противоположности с теорией Большого взрыва, в которой вся материя/энергия была в ранний момент огромная, инфляционная космология путем разработки залежей гравитации может произвести всю обыкновенную материю и излучение Вселенной из крохотного кусочка заполненного инфлатоном пространства.

Особая важность инфляционной космологии связана не только с пониманием пространства и времени, но и с решением вопроса о стреле времени. Для этого особенно важна история ранней Вселенной. Для объяснения стрелы времени единственным убедительным основанием может быть то, что ранняя Вселенная была чрезвычайно упорядоченной, т. е. имела экстремально низкую энтропию, что сделало возможным будущее, в котором энтропия всегда увеличивается. Остается открытым вопрос: как могла возникнуть эта высоко упорядоченная низкоэнтропийная субстанция в стартовой точке.

Инфляционная космология дает основание для прорыва в этом вопросе. Чтобы это увидеть, надо помнить, что каждая избыточная концентрация вещества продолжает расти дальше благодаря гравитационному притяжению. То же происходит и с любой неоднородностью пространства. Но это относится исключительно к обычной притягивающей гравитации. В течение короткой инфляционной фазы гравитация была *отталкивающей*. Это все меняет.

Инфляционная космология задает направление стреле времени путем создания прошлого с чрезвычайно низкой *гравитационной энтропией*. Тогда будущее является направлением, *в котором энтропия возрастает!*

Результат, который достигнут теорией инфляции — гладкое, однородное расширение пространства, заполненного почти однородно распределенной материей, — это та низкоэнтропийная конфигурация, которая дает объяснение для *стрелы времени!*

Инфляция представляет собой механизм, который создает большую Вселенную с относительно низкой *гравитационной энтропией* и, таким образом, создает основу для последующих миллиардов лет *гравитационного скручивания материи*, которое приводит к тому, результатом и свидетелями чего мы являемся. Поскольку *стрела времени* задана инфляционной космологией *через создание прошлого* с чрезвычайно низкой гравитационной энтропией, возрастание энтропии определяет направление стрелы времени нашего будущего. Этап инфляционного расширения — более ранний этап истории Вселенной — объясняет гладкие и однородные условия после взрыва. Но что такое инфлатон? Почему возникли условия для инфляционного взрыва? Это остается большим вопросом.

Идея Больцмана объяснить возникновение Вселенной через особую флуктуацию не могла объяснить, почему эта флуктуация оказалась так далека от хаоса и произвела Вселенную с упорядоченностью гораздо большей, чем это было нужно для возникновения жизни.

Инфляционная теория основывается на малой флуктуации, которая представляет вполне ординарный скачок к подходящим условиям в крошечном клочке пространства,

а это дает сразу и неизбежно гигантскую и упорядоченную Вселенную. И если инфляционное расширение началось, то крошечный клочок будет неумолимо растянут до масштабов, по меньшей мере, нашей Вселенной, а поэтому нет загадки в том, что Вселенная, которую мы видим, не является крошечным уголком, а так обширна и населена огромным числом галактик. «Инфляция упаковывает все богатство объяснительной и предсказательной силы в единственную *флуктуацию к низкой энтропии*» [3].

Инфляция определила для крошечной крупинки гигантское расширение так, что 14 млрд. лет последующего раскручивания, последующей концентрации вещества в галактики, звезды, планеты, в целом не представляют загадки.

Существует отличная от нуля вероятность возникновения в бесконечной Вселенной необходимых условий для инфляционного расширения в изначальном состоянии высокой энтропии и полного хаоса, причём не обязательно в отдельно взятом кусочке пространства. Таких кусочков, разбросанных в разных местах, может быть множество [6]. Наша Вселенная может быть одной из многих, когда случайные флуктуации создавали условия, подходящие для инфляционного взрыва.

Низкоэнтропийная, высокоупорядоченная, однородно гладкая ткань пространства, созданная инфляционным расширением — это то самое раннее состояние высокого порядка, которое дает начало Вселенной с ее последующей эволюцией к более высокой энтропии. В этом и состоит природа стрелы времени!

Инфляция предлагает объяснительные рамки для проблем, которые кажутся несопоставимыми — проблема горизонта Вселенной, проблема плоскостности, проблема происхождения структур (галактики, неоднородности температуры фонового излучения), проблема низкой энтропии ранней Вселенной — для всех этих проблем инфляция дает единое решение. Но для этого нужна теория, которая может справиться с экстремальными условиями в ранние моменты космоса. Такой теорией может быть теория, способная преодолеть величайшую проблему теоретической физики — фундаментальную несовместимость общей теории относительности и квантовой механики. Такой теорией является теория суперструн, которая привлекает наибольшее внимание физиков в решение этих проблем.

ТЕОРИЯ СТРУН

Единая теория — это главный вопрос, который стоял перед Эйнштейном до конца его жизни [6]. В этой работе Эйнштейн оставался в одиночестве. Однако за последние три десятилетия произошли радикальные изменения в поисках единой теории. Главная цель современной задачи унификации заключается в объединении общей теории относительности и квантовой механики.

Понятие пустого пространства, как пространства, которое ничего не содержит, несовместимо с квантовым принципом неопределенности.

Реальность колебаний квантового поля даже в пустом пространстве была показана экспериментально. Понятие абсолютного пространства-времени, экспериментальные результаты, доказывающие нелокальность квантовой механики, ускоренное расширение Вселенной — эти результаты диктуют постановку конкретных вопросов о природе пространства и времени.

Квантовые флуктуации существуют как для полей внутри пространства, так и для самого пространства, ибо форма пространства и гравитационное поле — это одно и то же.

На привычных масштабах квантовые возмущения пространства не наблюдаемы, но на масштабах порядка планковской длины пространство бурлит бешеными флуктуациями. На масштабах меньше планковской длины и планковского времени обычные понятия пространства и времени оказываются неприменимыми.

Изменение формы пространства и времени общей теории относительности Эйнштейна сталкивается с принципом неопределенности квантовой механики, который определяет квантовые флуктуации гравитационного поля. На мельчайших масштабах пространство и время превращаются в среду буйных флуктуаций.

Общая теория относительности применима для больших и массивных объектов, квантовая механика — для мелких и легких, но для единой схемы они несовместимы. Такое разделение Вселенной на две обособленные реальности представляется противоестественным. Должна существовать единая теория, которая применима ко всему. Действительно, большинство объектов можно делить на большие и маленькие, первые могут быть описаны с помощью общей теории относительности, вторые — с помощью квантовой механики. Но есть объекты, для которых необходимы оба подхода — это *черные дыры*.

Для них необходима общая теория относительности, так как большая масса создает мощное гравитационное поле, но, в то же время, надо использовать квантовую механику, так как вся масса втиснута в микроскопический размер. Подобная проблема тесно связана с решением вопроса о происхождении Вселенной. Ранняя Вселенная — это гигантская плотность при крохотных размерах. Чтобы понять истоки Вселенной, необходимо преодолеть конфликт между общей теорией относительности и квантовой механикой.

Поскольку Вселенная у нас одна, то и для решения вопроса о происхождении Вселенной должна быть создана единая теория. По мнению многих физиков, именно теория суперструн имеет основания для успешного объединения общей теории относительности и квантовой механики и создания квантовой теории гравитации. Кроме того, теория суперструн может оказаться полностью унифицированной теорией всех сил и всей материи, а именно единой теорией, которая приведет нас к самым глубоким законам Вселенной. Теория струн была создана при изучении сильного ядерного взаимодействия. Для рассмотрения этого взаимодействия были предложены маленькие эластичные нити, их назвали струнами. Из квантово-механических уравнений теории струн следовало, что при высокоэнергетических столкновениях в ускорителях должны в изобилии рождаться частицы с нулевой массой и спином 2. Ранее эти частицы не наблюдались. Однако в дальнейших работах по объединению общей теории относительности и квантовой механики было получено, что гравитационные силы должны переноситься частицами подобно электромагнитным силам, которые переносятся фотонами. Теоретический анализ убедительно показал, что гравитационные силы должны переноситься частицами с нулевой массой и спином 2, а это — гравитон, который был получен в теории струн. Было показано, что теория струн с необходимостью включает квантово-механическое описание гравитации. Кроме того, в теории струн была решена проблема аномалий, это достижение доказало математическую состоятельность теории и ее квантово-механическую жизнеспособность.

Теория струн показала возможность успешного подхода к соединению гравитации и квантовой механики. Для создания унифицированной теории стояла задача — дать единое описание всей материи и всех взаимодействий. Обычная теория, использовавшаяся в современных экспериментах, рассматривала элементарные частицы как точки без пространственной протяженности, как конец процедуры деления.

Вместо модели точечно-подобной частицы теория струн предлагает представление каждой частицы в виде крохотной вибрирующей нити энергии. Эти нити не имеют толщины, только длину, т. е. струны являются *одномерными сущностями*. Все многообразие элементарных частиц в теории струн заменяет один фундаментальный ингредиент — струна. А все богатство разновидностей частиц представляют различные типы колебания этой струны. Так же, как виолончельная струна может колебаться множеством различ-

ных способов, так и струны в теории струн могут вибрировать различными способами. Разным модам колебаний струны соответствуют разные частицы. Так, было установлено, что один вид колебаний струны обладает свойствами, характерными для гравитона. Помимо успешного подхода к соединению гравитации и квантовой механики, теория струн дает возможность единого описания для всей материи и всех взаимодействий. Главное новое свойство теории струн в том, что ее основной ингредиент — не точечная частица, а объект, который имеет *пространственную протяженность*. Это свойство имеет ключевое значение для успеха теории струн в соединении гравитации и квантовой механики. Ненулевой размер гравитонов устанавливает предел на уровне планковской длины (10^{33} см) с точностью, до которого может быть разрешено гравитационное поле.

В любой теории, основанной на точечных частицах нулевого размера, квантовая неопределенность дает дикое флуктуации, которые исключают гладкое пространство общей теории относительности Эйнштейна. Однако теория, основанная на струнах, включает встроенную защиту от отказов, ибо струны являются самыми мелкими составными частями. Таким образом, теория струн ограничивает величину флуктуаций гравитационного поля, этот предел дает основание, чтобы избежать *конфликта между квантовой механикой и общей теорией относительности*.

Еще до теории струн физики высказывались за существование симметрии между частицами с целым и с полуцелым спином. Эта симметрия была названа суперсимметрией, однако в стандартной теории, основанной на точечной модели частиц, суперсимметрия не получила доказательства.

В теории струн было показано, что способы вибрации возникают парами. Для каждого способа колебаний со спином $\frac{1}{2}$ имеется ассоциированный способ колебаний со спином 0, а для каждого способа колебаний со спином 1 имеется ассоциированный способ колебаний со спином $\frac{1}{2}$ и т. д.

Теория струн доказала, что она является суперсимметричной теорией струн, или теорией суперструн. Именно с этим связан результат взаимного уничтожения аномалий, который был получен позднее. Кроме того, теория струн начала доказывать свою жизнеспособность путем установления, что ее моды колебаний объясняют существование частиц стандартной модели.

Число различных способов колебаний струны практически бесконечно. Однако число известных частиц в таблицах вполне конечно. Причем массы частиц, полученные экспериментально, не похожи на массы допустимых мод колебаний струны. Это глубокое несоответствие между теорией струн и реальным миром представляет серьезную проблему, которая ставит под сомнение теорию струн.

Однако в теории струн получен результат, который ставит проблему еще большей важности, но вместе с тем и определяет стратегию для объяснения свойств наблюдаемых частиц. Было установлено, что уравнения теории струн математически состоятельны, только если Вселенная имеет девять пространственных измерений. Теория струн требует существования *шести измерений*, которых никто никогда не видел. Это представляет серьезную проблему. Но теоретические открытия по созданию единой теории показали, что дополнительные измерения вовсе не обязаны быть проблемой. И дальнейшие работы физиков показали, что дополнительные измерения позволяют преодолеть пропасть между модами колебаний струн и элементарными частицами, открытыми экспериментально. Впервые теория предсказывает число пространственных измерений Вселенной, которое равно девяти, — не больше, не меньше.

Существование гравитона, суперсимметрия и дополнительные измерения — это результат, который следует из теории струн, а не привносится извне на основании экспериментальных наблюдений. И что особенно важно — это то, что уравнения теории струн

определяют не только число дополнительных измерений, но и их форму, которую имеет сложный класс шестимерных форм, известных как пространства Калаби-Яу.

Пространство Калаби-Яу связано с трехмерным пространством в каждой его точке. Когда мы перемещаемся в пространстве, то мы перемещаемся через все девять пространственных измерений, не замечая шесть дополнительных измерений, ибо они для нас слишком малы. Но для струн они вполне годятся. Струны столь малы, что даже когда дополнительные шесть измерений свернуты в пространство Калаби-Яу, струны могут колебаться в этих направлениях. Это чрезвычайно важно по двум причинам. Во-первых, это обеспечивает условие для колебания струны во всех девяти пространственных измерениях, это значит, что условие на число способов колебаний струны выполняется в точности. Во-вторых, моды колебаний струны подвергаются воздействию искривлений и поворотов в геометрии дополнительных шести измерений. Если форму и размер дополнительных шести измерений модифицировать, то это повлияет на способы колебаний, как и в случае музыкальных инструментов. Но способ колебания струны определяет его массу и заряд, а это значит, что дополнительные измерения играют центральную роль в определении *свойств частиц*. Поскольку от свойств частиц зависит вся структура Вселенной от галактик и звезд до существования жизни, то код космоса может быть записан в геометрии пространств Калаби-Яу.

Свойства колебательных мод струн детально определяются выбором пространства Калаби-Яу. Однако вопрос об этой связи — это задача работ на сегодняшний день — остается без ответа. Современное состояние теории таково, что уравнения неизвестны, а приближенных уравнений недостаточно для определения точного размера и формы дополнительных измерений. Однако получен ряд таких пространств Калаби-Яу, которые в точности дают как правильное число частиц, так и правильные электрические заряды известных частиц. Таким образом, теория струн позволяет, по крайней мере в принципе, определить все свойства частиц *из самой теории*. В этом еще одно принципиальное отличие ее от стандартной теории, в которой свойства частиц получаются на основании экспериментальных данных, которые привносятся в теорию извне.

Есть все основания надеяться, что теория струн в недалеком будущем сможет объяснить фундаментальные свойства частиц, а значит, ответить на вопрос, почему наша Вселенная такова, какова она есть.

Решение вопроса о происхождении Вселенной требует, прежде всего, понимания изначальной Вселенной, решение вопроса о природе пространства, времени и стрелы времени.

В начальный момент пространство и время еще только должны были возникнуть из более фундаментальных сущностей — что это такое? — основной вопрос теории струн.

Из общей теории относительности хорошо видно, что физика гравитации контролируется геометрией пространства. Дополнительные пространственные измерения, полученные в теории струн, дают основание предположить, что мощь геометрии в определении физики значительно возрастает. Теория струн установила, что число измерений, образующих ткань пространства, намного больше, чем мы непосредственно наблюдаем. Значит, число измерений не является фундаментальным [5]. Это дает ключ к решению самых глубоких тайн Вселенной. Привычные понятия пространства и времени, как мы их до сих пор понимали, могут быть лишь приближениями к более фундаментальным концепциям, разработка которых составляет главную цель в решении вопроса о происхождении Вселенной.

Предположение, исходящее из теории струн, состоит в том, что пространство-время, возможно, соткано из струн, подобно ткани для рубашки. Такая картина выглядит весьма заманчивой, однако ее несостоятельность слишком очевидна. Дело в том, что мы представляем струны вибрирующими в пространстве и времени, но без самой ткани пространства-

времени, которую должны образовывать сами эти струны. Представления о пространстве и времени бессмысленны, пока неисчислимые струны их не образуют, т. е. пока нет пространства и времени. Очевидно, требуется полностью беспространственная и безвременная формулировка теории струн, в которой пространство-время возникло бы как результат коллективного поведения струн. Такая беспространственная и безвременная формулировка струнной теории имеет название формулировки независимой от фона. Пространство и время не возникают из теории, как это должно быть в независимой от фона концепции, а вводятся в теорию самим теоретиком. Значит, разработка независимой от фона формулировки представляет наиболее значительную нерешенную проблему теории струн.

Данные, полученные в теории черных дыр, особенно важны в решении этого вопроса. Черная дыра имеет максимально возможную энтропию. Ответ на вопрос — чему она равна? — был получен в работах Бекенштейна [10] и Хокинга [8]. Проведенный ими математический анализ показал, что энтропия черной дыры пропорциональна площади ее горизонта событий. Непосредственный расчет полностью подтвердил их результат [11]. Черные дыры устанавливают *предел количеству энтропии*, которое может быть помещено в заданную область пространства, равную размеру черной дыры!

Количество энтропии, заключенной в черной дыре — это не только фундаментальное свойство самой черной дыры, но и является чем-то фундаментальным самого пространства: максимальное количество энтропии, которую можно вместить в заданную область пространства — любую область, где угодно, в любое время — равняется количеству энтропии, содержащейся в черной дыре того же размера.

Существование предела энтропии указывает на то, что пространство имеет атомизированную структуру. Это доказывает в ультрамикроскопическом масштабе также и существование минимального размера, равного планковской длине 10^{-33} см. Согласно Бекенштейну и Хокингу, энтропия черной дыры равна числу клеток, уместившихся на горизонте событий, если размер каждой клетки — 10^{-66} см². Значит, планковская клетка — это фундаментальный элемент пространства, и каждая такая клетка несет минимальный, единичный элемент энтропии. Понятие предельной энтропии приводит нас к представлению *пространственного элемента*.

Такая постановка вопроса заставляет пересмотреть смысл волновой функции. Так же, как уравнение Ньютона определяет изменение состояния системы в классической физике, так и уравнение Шредингера определяет изменение состояния в квантовой механике. Именно поэтому с *детерминизмом в квантовой механике* все в порядке, как отмечает академик Л. Фаддеев [7]. Именно понятие состояния составляет основной смысл волновой функции, а вовсе не представление о волне вероятности, о чем чаще всего упоминают. Но понятие состояния объекта может определяться через беспространственные и безвременные ингредиенты пространства-времени, тогда как понятие вероятности является результатом появления наблюдателя и измерения, которое производится уже в готовом пространстве и времени. Установление природы пространства и времени дает возможность вплотную подойти к решению вопроса о происхождении Вселенной, ее начальной стадии. Теория струн с неизбежностью ставит вопрос о фундаментальности пространства и времени.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 256 с.
2. Гамов Г. Создание Вселенной. Viking Press, 1952.
3. Грин Б. Ткань космоса: пространство, время и текстура реальности. — М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2009, — 526 с.

4. Грин Б. Элегантная Вселенная. — М., Едиториал УРСС, 2004. — 290 с.
5. Гросс Д. Грядущие революции в фундаментальной физике. Проект «Элементы». Вторые публичные лекции по физике (25.04.2006). <http://elementy.ru>.
6. Линде А. Многоликая Вселенная. Всероссийский проект «Открытые публичные лекции». ФИАН, 10.06.2007, <http://elementy.ru>
7. Фаддеев Л. Природа. АН СССР, 1989, № 5, 11 с.
8. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб., Амфора / Эврика, 2001. — 192 с.
9. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. — М., Наука, 1966. — 623 с.
10. Bekenstein Jacob D. (April 1973). «Black holes and entropy». *Physical Review D* 7 (8): 2333–2346. doi:10.1103/PhysRevD.7.2333.
11. Strominger A. and Vafa C. Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy. *Phys. Lett. B* 379, 99 (1996) [hep-th/9601029].