

ЗНАНИЕ-СИЛА®

«Knowledge itself is power» (F. Bacon)

5/2019

6+

Вселенная, в которой мы живем



Поговорим о Вселенной



Наш собеседник **Валерий Анатольевич Рубаков** — физик-теоретик, специалист в области квантовой теории поля, физики элементарных частиц и космологии, академик РАН, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института ядерных исследований РАН, профессор, заведующий кафедрой физики частиц и космологии физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

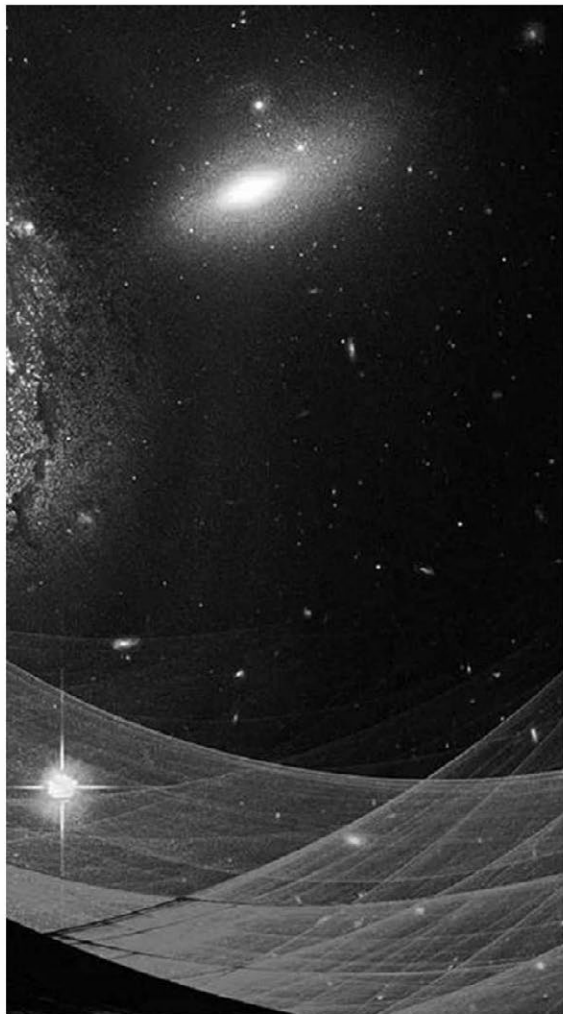
— Валерий Анатольевич, вы занимаетесь космологией. Эта наука изучает свойства Вселенной, самого крупного объекта, который мы можем наблюдать. Есть физики, которые изучают квантовую механику, физику элементарных частиц — то есть микромир, и которые космологией не занимаются.

— Есть, конечно.

— Однако, современный космолог не может не разбираться в квантовой механике, физике элементарных частиц.

— Это зависит от того, что понимать под словом «космология». На самом деле есть довольно большие области космологии, которые не тре-

буют знаний и методов физики элементарных частиц. Это наблюдательная космология, изучающая то, что вокруг: существование и образование космических структур, галактик, скоплений галактик. Это, в общем,



классические процессы, не требующие знания квантовой механики.

— Структуры галактик изучают и астрофизики, и астрономы.

— Да, это ближе к астрофизике. Хотя изучение распределения галактик во Вселенной относится к космологии: распределение, количество, рост галактик и скоплений галактик, как они возникали, как в целом вся эта картина структуры Вселенной появлялась.

— Но ведь свойства скоплений галактик зависят от свойств материи, которая, в свою очередь, определяется свойствами элементарных частиц.

— Это правильно, однако фактически всё, что вам нужно знать — это свойства частиц темной материи: тяжелые они, легкие, как они взаимодействуют между собой, если взаимодействуют. И надо быть уверенным, что гравитационные взаимодействия у них такие же, как у обычных частиц. Ну, и всё. Больше особенно ничего и не надо. Конечно, они описываются квантовой физикой, но в большинстве случаев это не очень существенно. Поэтому эти вопросы не требуют квантовой физики. А вот процессы, связанные, скажем, с тем, как изначально образовались неоднородности на самых ранних этапах существования Вселенной, — это уже квантовые процессы. И их изучение требует привлечения аппарата квантовой физики.

— Процесс расширения Вселенной как-то связан со свойствами микромира или нет?

— Что нужно знать для того, чтобы описать расширение Вселенной? Нужно знать свойства темной материи, нужно предположить, что существует темная энергия — может быть космологическая постоянная или что-то очень похожее на космологическую постоянную. И после этого расширение Вселенной на нынешнем этапе и на довольно ранних этапах уже может быть описано опять-таки в рамках более или менее классической физики. Не квантово-механической, не квантовой, а классической физики.

— Сейчас космологам известно, что происходило в первые доли секунды существования Вселенной. Картина довольно хорошо подтверждается наблюдательными данными.

— Это так.

— Они знают, что происходило и после первой секунды. Практически всю историю существования Вселенной! Наверное, без знания свойств микромира это было бы невозможно?

— Конечно. Есть вещи, которые требуют знания свойств микромира. Например, откуда мы знаем про то,



се, о темпе расширения Вселенной, о ее содержании. Конечно, описание этих процессов требует привлечения ядерной физики, физики элементарных частиц. Надо хорошо знать, как происходит образование ядер, термоядерный синтез, для того, чтобы можно было это посчитать. Мы надеемся выяснить, как образовалась темная материя и что за частицы ее составляют. Это, конечно, тоже вопрос к физике микромира. Пока что мы не знаем, из каких частиц она состоит. Их пока прямо не обнаружили. Знаем только их воздействие на расширение



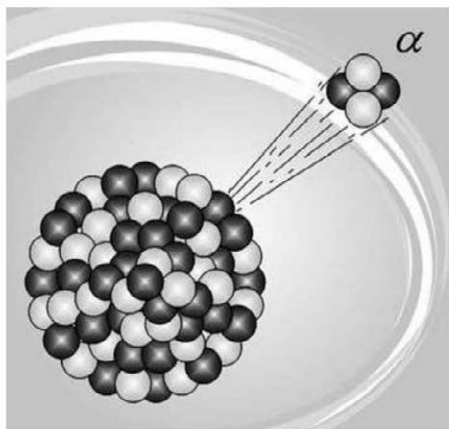
как была устроена Вселенная через одну секунду после Большого взрыва, или чуть позже? Мы знаем это из первичного нуклеосинтеза. Это процессы образования легких ядер из протонов и нейтронов. Тогда образовывался дейтерий, потом он перерабатывался в тритий, в конце концов, образовывались легкие ядра вплоть до лития седьмого*. В основном альфа-частицы** — ядра гелия-четыре. И по тому количеству, в котором они образовались, мы можем судить о самом процес-

се, о темпе расширения Вселенной, о ее содержании. Конечно, описание этих процессов требует привлечения ядерной физики, физики элементарных частиц. Надо хорошо знать, как происходит образование ядер, термоядерный синтез, для того, чтобы можно было это посчитать. Мы надеемся выяснить, как образовалась темная материя и что за частицы ее составляют. Это, конечно, тоже вопрос к физике микромира. Пока что мы не знаем, из каких частиц она состоит. Их пока прямо не обнаружили. Знаем только их воздействие на расширение

се, о темпе расширения Вселенной, о ее содержании. Конечно, описание этих процессов требует привлечения ядерной физики, физики элементарных частиц. Надо хорошо знать, как происходит образование ядер, термоядерный синтез, для того, чтобы можно было это посчитать. Мы надеемся выяснить, как образовалась темная материя и что за частицы ее составляют. Это, конечно, тоже вопрос к физике микромира. Пока что мы не знаем, из каких частиц она состоит. Их пока прямо не обнаружили. Знаем только их воздействие на расширение

* Природный литий состоит из двух стабильных изотопов: ${}^6\text{Li}$ (7,5%) и ${}^7\text{Li}$ (92,5%).

** Альфа-частица (α -частица) — положительно заряженная частица, образованная двумя протонами и двумя нейтронами.



Альфа-частица — ядро гелия-4

го, мы давно знаем электромагнитную и гравитационную постоянные. И оказывается, что все эти константы имеют весьма удачные для нас значения...

— Да, это так. Мы не имели бы сложных молекул в природе, если бы не существовал легкий — много легче протона — электрон, а константа электромагнитного излучения не была бы достаточно мала. От соотношения масс электрона, протона и нейтрона



ны это знать, потому что в астрофизике тоже есть много процессов, которые требуют знания, по крайней мере, ядерной физики, физики элементарных частиц не очень высоких энергий.

— Изучение микромира дает знание констант, связанных с микромиром. Это константы слабого и сильного фундаментальных взаимодействий, массы частиц, которые определяются взаимодействием с полем Хиггса. Кроме то-

Процесс термоядерного синтеза чрезвычайно интересует ученых

вместе с электромагнитной постоянной зависят плотности всех веществ, возможность сложной химии. Если бы нейтрон был чуть полегче, или протон чуть потяжелее, то во Вселенной после Большого взрыва протоны распались бы и остались бы одни ней-

троны. И не было бы вообще атомов. А масса протона напрямую зависит от константы сильных взаимодействий, а разница в массе нейтрона и протона — от масс кварков.

— *То есть все константы имеют нужное для нашего существования значения.*

— Да, небольшое изменение каждой из них сделало бы Вселенную непригодной для известной нам формы жизни, а, скорее всего, для жизни вообще.

— *И встает тот самый вопрос, который давно уже волнует людей: как возник этот мир? Вполне закономерный вопрос.*

— Вечный вопрос.

— *Тут в пору затронуть тему антропного принципа. Есть два принципиальных варианта. Один — считать, что этот мир создан для нас кем-то. Богом, Творцом, Космическим разумом. То есть предполагать некое целенаправленное вмешательство. Другой вариант — считать, что некие физические процессы привели к тому, что мы оказались в этой Вселенной, имеющей такие свойства. Этот вариант принято называть слабым антропным принципом. В отличие от первого — сильно.*

— Первый давайте сразу отложим в сторонку. Потому что он не совсем научный — это вопрос веры. А слабый антропный принцип, наоборот, вполне научный. Он предполагает наличие множества возможностей, наличие многих мест во Вселенной или множества разных вселенных...

— *Наличие большого числа, может, даже бесконечного числа вселенных.*

— Ну, или вселенных, или, в другом варианте, в предположении, что Вселенная очень большая и очень разнообразная по своим свойствам в разных местах, наличие разных мест.

— *Тогда Вселенная с большой буквы — нечто гораздо большее, чем наша вселенная.*

— Огромная. Мы живем в ее части. Ну, и вполне может оказаться так, что в разных частях Вселенной (или в разных вселенных) разные физические законы, разные физические константы, разные физиче-

ские взаимодействия, физика совсем разная. Ну и мы оказались там, где мы могли оказаться. Не то, что нам повезло. Везения никакого нет. Мы оказались там, где есть такая возможность. В других местах такой возможности нет. Полная аналогия с тем, как мы живем на Земле. Мы ведь не можем жить в произвольной точке космоса.

— *Только там, где есть возможность существования органической жизни. Для чего надо выполнить множество условий: наличие звезды определенного типа, наличие планетной системы, наличие твердой планеты в зоне обитаемости, на которой присутствует вода в жидкой фазе, и еще уйма чего. В принципе, можно говорить о неких ступенях возможностей для жизни. Первая — это Вселенная, в которой возможно существование значительного числа элементов.*

— И химия. Нам химия очень не вредна.

— *Разумеется. Она необходима для существования сложных молекул. Второе — это существование условий, необходимых для возникновения космических объектов, которые, в конце концов, приводят к образованию Солнечной системы и одной из планет в зоне обитаемости, на которой возникает жизнь, а в результате долгой эволюции появляются разумные существа.*

— По крайней мере, так мы думаем. Хотя слабый антропный принцип не до конца сформулирован. Потому что слово «жизнь» может иметь много разных смыслов. Лучше говорить о существовании наблюдателя. И следует допустить возможность существования наблюдателя совершенно другого типа.

— *У Айзека Азимова был рассказ про мыслящее межзвездное облако, которое питается энергией звезд. Оно пощадит жизнь на Земле и ушло от Солнца, чтобы земная жизнь не погибла.*

— Мы пока не знаем, какие бывают формы жизни, кроме земной.

— *Но если говорить об органической жизни...*

— Если думать о наблюдателях нашего типа, то да, нужны и химия,

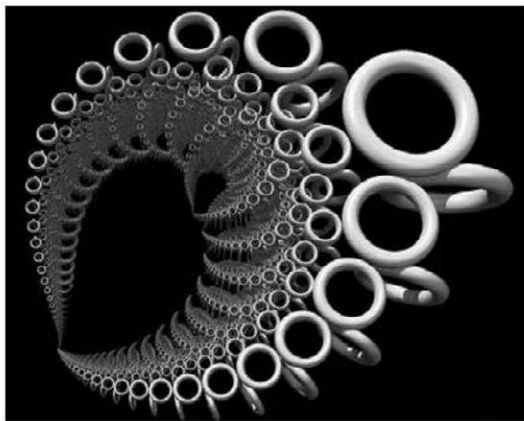
и Солнце, и соответствующая планета, и много еще чего.

— *И вот вопрос, связанный именно со слабым антропным принципом. Если мы считаем, что верна инфляционная теория, которую предложил А. А. Старобинский, а потом развили А. Гут и А. Д. Линде, то она предполагает флуктуации вакуума и возникновение пузырей, которые начинают раздуваться, и один их таких пузырей — это наша вселенная. Хотя надо уточнить. Если все мироздание, в котором за счет флуктуаций возникают пузыри — Вселенная, то наш пузырь — часть Вселенной. И все, что происходит в нашей части Вселенной, определяется соответствующим набором констант. Но в других пузырях, то есть в других частях Вселенной, набор констант другой, и там вообще может не быть галактик, звезд, планетных систем и какой-нибудь формы жизни. Но как в процессе флуктуаций вакуума и образования пузырей возникают константы? Те константы, которые определяют, если можно так выразиться, судьбу той или иной части Вселенной.*

— Это не очень разработанный вопрос: как возникают разные части Вселенной с разной физикой? Такая возможность есть в теории суперструн. Оказывается, что она допускает существование огромного числа вакуумов. Вакуум — это устойчивое состояние. И в каждом своя физика. В каждом свои константы, в каждом свои частицы, типы частиц и все остальное.

— *Струнная теория описывает частицы как некий аналог струн, совершающих определенные колебания...*

— В принципе, да. Но важно другое. Важно, что там есть множество возможностей, вот с чем связанных. Теория суперструн предполагает существование десяти измерений. Не четырех, как у нас (три пространственных, одно — время), а десяти. (Хотя в версии более широкой теории, чем теория суперструн, их даже одиннадцать). И необходимо объяснить, как лишние шесть измерений оказались ненаблюдаемыми. И наиболее логичное объяснение — что они компактные, не бесконечные, как три известные нам измерения, а наобо-



Теория струн
в представлении художника

рот, очень маленькие, колечки такие, условно говоря. И из-за того, что они очень маленькие, мы их не чувствуем.

— *То есть, они существуют на уровне микромира?*

— Да. И надо иметь очень высокие энергии, чтобы доказать, что есть на самом деле такие колечки. Хотя, строго говоря, это не колечки, а некие довольно сложные геометрические объекты. Вот тут-то и появляется огромное количество возможностей. Потому что эти многообразия могут быть очень разными. И разные поля в результате этих многообразий могут быть. Появляется безумное количество возможностей. 10^{500} вариантов! И от того, как устроены эти все многообразия и какие там есть поля — от этого зависит уже наблюдаемый спектр частиц, то, что у нас есть в большом четырехмерном пространстве. Какие есть электроны или не электроны, протоны — не протоны, их взаимодействия. Все зависит от того, как произошла компактификация, то есть свертывание дополнительных измерений. Из-за того, что таких способов очень много, появляется возможность существования очень большого числа разных физик в микроскопическом мире.

Теперь о том, как происходит попадание в один или в другой вакуум. То есть, как множество возможностей реально, динамически реализуется? Это

вопрос не разработанный. То есть, возможность такая имеется, но как именно динамически она может реализоваться, как эти 10^{500} вакуумов существуют: в одном месте один, в другом — другой, в третьем — третий... Пока это вопрос не решенный.

— *Вот возникла часть Вселенной, в которой мы живем, наряду с другими частями Вселенной. Возникла с такими константами, которые делают возможным всё то, что происходило и происходит в нашей части Вселенной. А каков механизм поддержания констант? Почему они, установившись, не меняются?*

— Это можно связать с тем, что вакуумы в теории суперструн дискретны. Что не непрерывный набор возможностей существует, а дискретный. То есть, если уж вы попали в один набор констант, то там и будете оставаться. Если у вас произошла компактификация, дальше ее разрушить или заставить эти внутренние лишние измерения измениться не удастся, потому что для этого нужна гигантская энергия. Иными словами, если у вас дискретный набор констант, то вам надо «перепрыгнуть» из одного набора в другой, надо потратить очень много энергии. Поэтому, как только вы попали в более-менее низкоэнергетическую ситуацию, температура у вас не 10^{18} ГэВ, а на несколько порядков

меньше, или темп расширения не гигантский, то у вас уже недостаточно энергии, чтобы совершить переход. Поэтому константы «замораживаются» в этой части Вселенной. И то, что мы имеем действительно дискретный набор параметров — это вроде видно. Хотя и 10^{500} вариантов, но их все-таки конечное и дискретное количество.

— *Такой подход проясняет будущее нашей части Вселенной?*

— Нет. Наше будущее зависит совсем от другого. Наше будущее зависит от того, что такое темная энергия. Она сегодня доминирует, большая часть энергии в ней как раз сосредоточена — 70% примерно. А дальше она будет еще больше доминировать. Через несколько десятков миллиардов лет уже вклад материи в плотность энергии будет совсем незначительным. Подавляющий вклад давать будет темная энергия. И будущее зависит от того, как она будет меняться со временем, и будет ли меняться.

— *Некоторые космологи ставят знак равенства между энергией вакуума и темной энергией. Это уже как-то устоялось?*

— Нет. Это не известно. Это одна из возможностей, что темная энергия, энергия вакуума или космологическая постоянная — это одно и то же. Вообще говоря, обсуждается возможность того, что темная энергия — это



А это, в представлении художника, энергия вакуума

не постоянная величина. А энергия вакуума должна быть постоянна во времени. Почти по определению. Раз вакуум не меняется локально, значит, у него плотность энергии фиксирована. Ну, а в формулах общей теории относительности это просто постоянная величина, космологическая постоянная. Хотя, может быть, она зависит-таки от времени, тогда это не энергия вакуума в прямом понимании этих слов, это энергия какого-то гипотетического нового поля, которое «разлито» в нашей части Вселенной и несет на себе эту темную энергию. И от этого действительно зависит наше будущее. Если это энергия вакуума, то нашей части Вселенной бесконечно расширяться, а если это энергия некоего поля, то не обязательно. Тогда расширение может остановиться.

— *Если расширение будет бесконечным, то, в конце концов, все вещество будет разорвано на отдельные частицы...*

— Да. Это еще одна возможность. Если темная энергия постоянна во времени, то ничего такого не будет, будет постоянное расширение с тем же темпом, как сегодня. Медленное. Но если темная энергия растет во времени, то тогда темп расширения будет увеличиваться. В принципе, возможно то, что называют «Большой разрыв».

— *Это когда силы тяготения в галактике уже будут недостаточны, чтобы удерживать объекты.*

— Совершенно верно. Когда Вселенная настолько быстро будет расширяться, что сначала Галактику разорвет, потом Солнечную систему, а потом — Землю. И так далее. Такое не исключено. Пока мы не знаем, как устроена темная энергия, такое исключать нельзя.

— *Но это будет, в любом случае, не скоро.*

— Через 20 миллиардов лет как минимум.

— *Вопрос, который волнует людей, не имеющих физического образования: почему космологи утверждают, что у Вселенной, а если соблюдать нашу договоренность, то правильнее сказать у нашей части Вселенной, нет границ? Это же действительно странно: пространство есть, а границ нет.*

— Стандартная аналогия — воздушный шарик. Вот у вас есть воздушный шарик, он расширяется, раздувается и может раздуться до гигантских размеров. А вы можете ходить только по его поверхности. И тогда для вас никакой границы нет. Будете ходить, и ходить, и, может быть, в конце концов, возвратитесь назад. Пока он не слишком раздуется. Но сколько бы вы ни ходили, никогда никакой границы вы не увидите.

— *Здесь аналог такой же, но только в трехмерном пространстве?*

— Да. Только это не двумерный шарик, а трехмерный. Это — во-первых. А во-вторых, воздушный шарик мы себе представляем вложенным в трехмерное пространство. А наше трехмерное пространство, скорее всего, никуда не вложено. Но оно может быть замкнуто. Поэтому мы можем перемещаться по нему бесконечно. Но границы никогда не достигнем.

— *В процессе расширения нашей части Вселенной увеличивается количество пространства?*

— В каком-то смысле, да. Хотя такого термина нет — количество пространства.

— *Но Галактики и скопления галактик разбегаются.*

— Все расстояния увеличиваются. Можно говорить о растяжении пространства.

— *Завершу наш разговор таким вопросом: мы говорили о теории инфляции, согласно ей наша вселенная — часть еще более огромной Вселенной. Но теория инфляции, строго говоря, не доказана. Есть ли надежда, что мы получим доказательства ее верности?*

— Теория инфляции получит подтверждение с обнаружением реликтовых гравитационных волн. Речь об очень длинных волнах, сравнимых с размерами нашей части Вселенной — длина таких волн в миллиарды световых лет.

— *Реально ли их обнаружить?*

— Да. По поляризации реликтового микроволнового излучения. Результат может быть получен в обозримом будущем.

Беседу вел Игорь Харичев

ГЛАВНАЯ ТЕМА

Александр Винничук

История Большого
взрыва в научной
картине мира:
как происходил
великий переход
от пустоты к бытию

Взгляд с позиции инфляционной
квантовой космологии



XX век принес человечеству существенные открытия — прежде всего, в изучении черных дыр, времени, квантовой теории и Большого взрыва. За сто лет место человека во Вселенной изменилось до неузнаваемости. Нелегко было XVII веку смириться с подчиненным положением Земли по отношению к Солнцу, а следующим векам принять периферийность Солнечной системы и даже галактики Млечного Пути, а человеку осознать себя пылинкой во Вселенной. Но откуда взялась Вселенная? Кажется, что идея, будто все это получилось из ничего, противоречит логике и здравому смыслу.

Если мы откажемся от гипотезы Бога, то какие варианты ответа на загадку существования мира нам остаются? Возможно, когда-нибудь наука объяснит не только то, как мир устроен, но и почему он устроен именно так. По крайней мере, именно на это надеется, например, Ричард Докинз, который ищет ответ в теоретической физике, полагаясь на инфляционное расширение в первые доли секунды после Большого взрыва и на принцип космического отбора Вселенных, похожего на принцип естественного отбора Дарвина.

Большую часть истории философии считалось, что Вселенная вечна, а ее существование не слишком заботило ученых. Эйнштейн в своих гипотезах просто принял, что Вселенная вечна, и даже изменил уравнения теории относительности соответствующим образом. Однако с открытием Большого взрыва все изменилось. Эксперименты показывают, что мы живем в расширяющихся и одновременно охлаждающихся остатках космического комка, который взорвался около 14 с половиной миллиардов лет назад. Но что могло вызвать этот первоначальный взрыв? Что именно взорвалось? И что ему предшествовало — и предшествовало ли вообще что-нибудь? Почему существует мир?

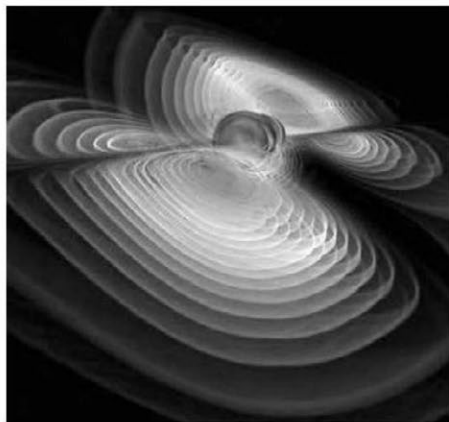
Винничук Александр Александрович, кандидат философских наук, популяризатор науки.

Почему он состоит из того, из чего он состоит? Эти вопросы определенно входят в компетенцию науки, но любая попытка науки на них ответить наткнется на концептуальную «стену», кажущуюся непреодолимой, известную как «сингулярность».

Стивен Хокинг подходит к вопросу с другой стороны: он разрабатывает теоретическую модель, согласно которой Вселенная, хотя и ограничена во времени, полностью содержится внутри себя самой, не имея ни начала, ни конца во времени. Хокинг утверждает, что в такой не имеющей границ модели не нужен творец — ни божественный, ни какой-либо еще. Однако даже он сомневается, что физические уравнения могут дать полный ответ на загадку существования. В книге «Краткая история времени» Хокинг признает, что вопрос о возникновении Вселенной в рамках современной физики остается нерешенным.

Предположение, что Вселенная расширяется (вопреки прежней статичной модели) подтверждено в 1929 году астрономом Эдвином Хабблом на основании наблюдений за спектром звезд. Окончательным подтверждением инфляции Вселенной стало обнаруженное в 1965 году реликтовое излучение, которое осталось со времен Большого взрыва. Два исследователя из «Белл телефон лабораторис» случайно обнаружили вездесущее ми-

*Реликтовые
гравитационные
волны*



кроволюновое излучение. Поначалу ученые подумали, что причиной постоянного шипения в микроволновом диапазоне является скверная деятельность голубей. Если включить телевизор и настроиться между станциями, то примерно 10% черно-белых крапинок на экране вызывается фотонами, которые остались с момента рождения Вселенной. Наглядней доказательство реальности Большого взрыва невозможно придумать — вы можете увидеть остывающие остатки Большого взрыва в собственном телевизоре.

Если проследить историю расширяющейся Вселенной вспять, Вселенная будет уменьшаться, пока в момент Большого взрыва не обратится в сингулярность. Здесь теория Эйнштейна прерывается и не может предсказать начало Вселенной и начало времени — только то, как она развивалась позже. В этой точке действуют законы квантовой механики: частицы движутся всеми возможными путями, и Вселенная может иметь бесконечное множество предысторий. Концептуальный тупик на Большом взрыве беспокоил космологов, и они стали искать сценарии, позволяющие избежать первоначальной сингулярности.

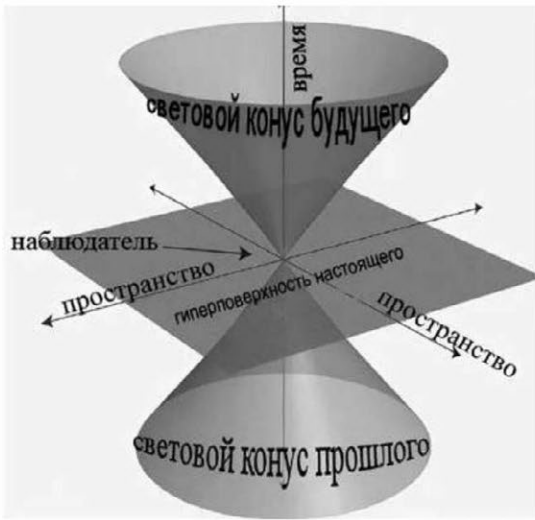
В 1970 году Стивен Хокинг и Роджер Пенроуз показали, что эти попытки не могут увенчаться успехом. Хокинг и Пенроуз начали со вполне логичного предположения о том, что гравитация всегда притягивает, и приняли плотность материи во Вселенной примерно равной измеренной экспериментально. На основе этих двух допущений они математически доказали, что в начале Вселенной все-таки должна быть сингулярность.

Означает ли это, что тайна происхождения Вселенной останется навсегда неразгаданной? Не совсем так, скорее расчеты Хокинга и Пенроуза показывают, что Большой взрыв не может быть полностью понят «классической» космологией, потребуются и другие теории. (Классическая космология — космология, основанная на общей теории относительности Эйнштейна).

Сторонники вечной и неизменной доктрины не приняли теорию Большого взрыва. Им показалось, что новая теория отдаст религией, она еще и противоречила постулату о бесконечности и вечности материи, что было одной из аксиом диалектического материализма. Физик Дэвид Бом называл создателей этой теории «учеными, которые фактически предали науку и отбрасывают научные факты, чтобы прийти к выводам, удобным для католической церкви»*. Не принял Большой взрыв и сам Эйнштейн: лишь незадолго до смерти он сумел преодолеть свои метафизические сомнения в отношении квантовой механики и назвал их «самой большой ошибкой в карьере». Таким образом, с открытием Большого взрыва стало гораздо труднее отмахнуться от метафизического вопроса Готфрида Лейбница «Почему существует Нечто, а не Ничто?»

В начале XX века считалось, что наша Вселенная состоит только из галактики Млечный Путь, которая плывет сама по себе в бесконечном пространстве. С тех пор ученые установили, что Млечный Путь является всего лишь одной из сотен миллиардов галактик (а в каждой находятся миллиарды звезд) — и это только в видимой нам части Вселенной. В настоящее время считается, что сам Большой взрыв лучше всего объясняет теория, названная «новая инфляционная космология». Согласно этой теории, взрывы, создающие вселенные, подобно Большому взрыву, случаются довольно часто. Инфляционная космология полагает, что наша Вселенная (которая возникла 14,5 миллиардов лет назад) появилась из пространства-времени уже существовавшей Вселенной и не является единственной физической реальностью, а представляет собой лишь невообразимо крохотную часть мультивселенной. Хотя каждый из миров внутри Мультиверсума имеет определенное начало во времени, вся самовоспроизводящаяся структу-

* Peat F. D. Infinite Potential. N. Y.: Perseus, 1996.



*Новая
инфляционная
космология*

чиняются определенному набору законов — причем довольно запутанному (если вспомнить математический аппарат теории струн)? Разве не проще было бы, если бы не было вообще ничего?

Для бесконечного во времени мира (неважно, соответствует ли он инфляционной или другой теории) не существует необъяснимого «момента творения», в нем нет места «первотолчку» или «первопричине», нет произвольных «начальных условий». Поэтому кажется, что вечный мир удовлетворяет принципу достаточной причины: его состояние в любой момент времени можно объяснить его состоянием в предыдущий момент.

Так если в момент Большого взрыва не было никакого перехода от Ничто к Нечто, то и нет надобности искать причину, божественную или какую-то иную, которая вызвала к жизни Вселенную? И также нет необходимости ломать голову над поставленным нами вопросом «Откуда взялись материя и энергия во Вселенной?»: внешнего и фантастического нарушения закона сохранения энергии-массы во время Большого взрыва не было. А Вселенная всегда обладала оди-

ра в целом может быть вечной. Мы вновь возвращаемся к концепции статичной Вселенной, которая казалась навсегда отброшенной с открытием Большого взрыва.

Тем не менее, возникает вопрос: почему же существуют вся эта материя и энергия? Почему четырехмерное пространство-время нашей Вселенной обладает определенной геометрической формой и имеет конечный возраст? Почему оно насыщено разнообразными физическими полями, частицами и силами? И почему эти поля, частицы и силы под-

наковой энергией-массой, от нулевого момента и до настоящего времени.

Согласно некоторым из солидных научных теорий (этого взгляда, например, придерживался Стивен Хокинг), всё, что когда-либо существовало или когда-либо будет существовать, действительно существует — не здесь и сейчас, но на каком-то пространственно-временном расстоянии от здесь и сейчас. Реальность вещей прошлого и будущего ничуть не уступает и ничем не отличается от той реальности, которой вы обладаете сейчас. Такое представление о времени называют **этернализмом**; это один из вариантов четырехмерности — теории, согласно которой реальность существует в виде четырехмерного пространства-времени.

Главным соперником этернализма является **презентизм** — представление о том, что существует только настоящее. Согласно презентизму, уже нет будущих или прошлых вещей и также невозможно указать, в каком смысле они наличествуют теперь. В классической физике, располагая полными данными о настоящем (вспомним Лапласа и его демона), мы можем легко восстановить картину прошлого. Это соответствует интуитивному убеждению в существовании лишь единственно определенного прошлого. Но квантовая физика утверждает, что при самом детальном наблюдении настоящего ненаблюдаемое прошлое неопределенно и представляет собой сумму предысторий.

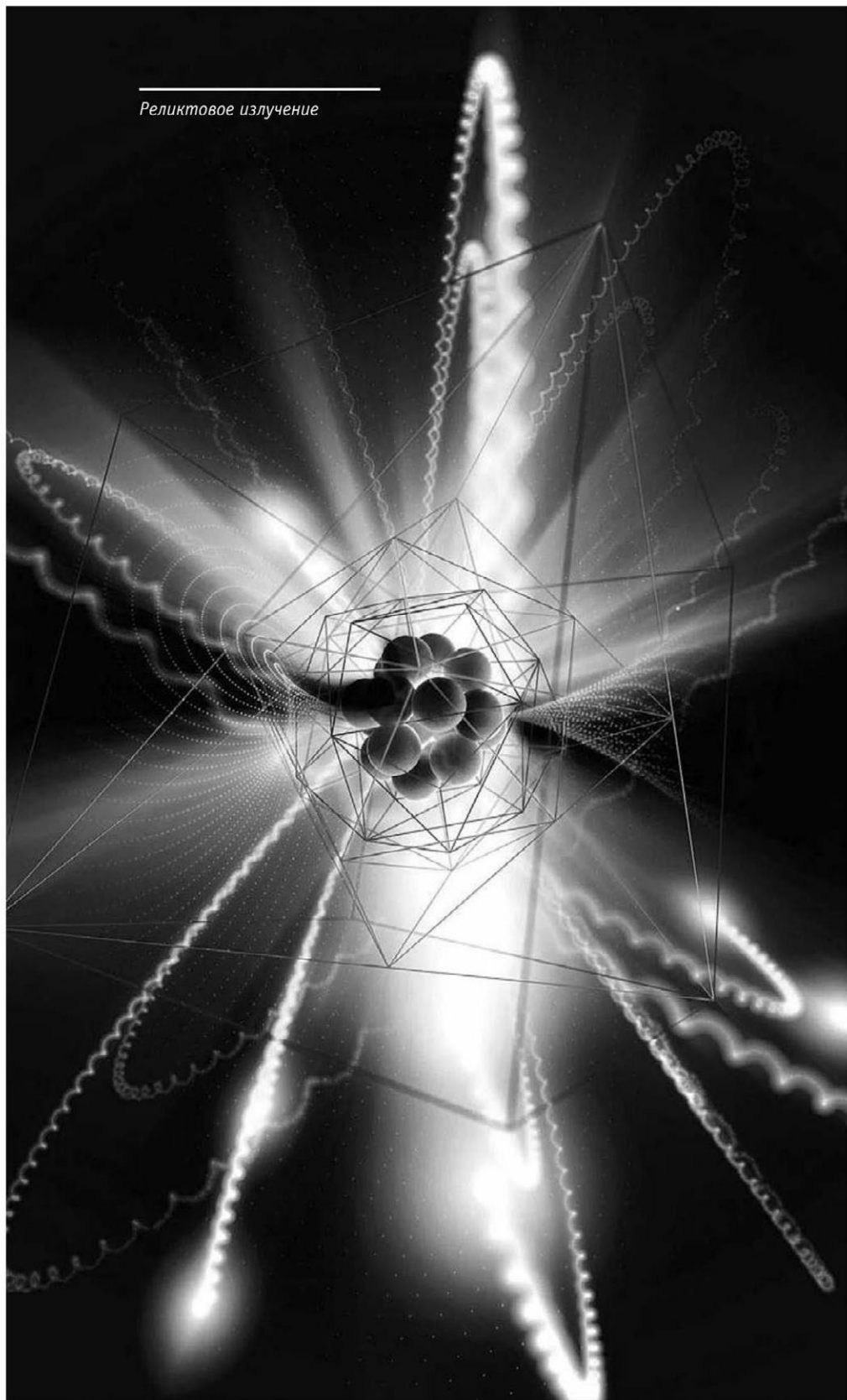
В середине 1940-х годов это коренное отличие квантовой механики от Ньютоновской сформулировал Ричард Фейнман: в Ньютоновской механике движущиеся предметы проходят через фильтр с двумя отверстиями строго определенным путем. Но если на фильтр направить пучок частиц (или даже одну частицу), они пройдут через эти отверстия всеми мыслимыми путями, и прямым, и через Альфу Центавра, и через соседний гастрон, пройдут в одно отверстие, выйдут через другое и снова войдут. Вместо классического детерминизма современная физика здесь имеет де-

ло со случайностью и вероятностью. Но эта фундаментальная случайность, так беспокоившая Эйнштейна, все же поддается математическому описанию. Фейнман ввел понятие «суммы предысторий» — это все возможные пути частиц, по итогам которых мы наблюдаем результаты эксперимента. Мы не можем предсказывать не только будущее, но и прошлое — как именно частица попала в конечную точку, но мы можем рассматривать совокупность всех возможных путей. В итоге основным методом квантовой физики стала «сумма альтернативных историй», то есть учет всех путей с расчетом вероятности каждого.

А поскольку ненаблюдаемое прошлое неопределенно, а наблюдение меняет поведение системы, то выводимое из наблюдений прошлое еще и изменено по сравнению с ненаблюдаемым: наблюдая за системой, мы меняем не только ее настоящее, но и прошлое. Как же возможно сочетание классической физики (имеющей дело с макрообъектами) с неопределенностью и непредсказуемостью квантовой механики? Вероятно, происходит примерно то же, что и в специальной теории относительности: теория начинает действовать в «экстремальных обстоятельствах». Такими «экстремальными обстоятельствами» для движущегося объекта становится приближение к скорости света: скорость начинает влиять на массу, а время замедляется и в конечном итоге останавливается.

В каком экстремуме квантовые законы и, как следствие, исчезновение измерения времени могут проявиться на уровне Вселенной? Очевидно, когда вселенная сравнима размерами с атомным ядром. Именно это подразумевает теория Большого взрыва: все начинается с сингулярности — точки, в которой температура, плотность и искривление Вселенной были бесконечны. Из этой точки Вселенная начинает расширяться, и расширение (в соответствии с инфляционной моделью) продолжается до сих пор. Обратив вспять расширение, мы

Реликтовое излучение



увидим, как содержимое Вселенной сближается, все более сжимаясь в одну точку. В конце концов, в самом начале космической истории, весь мир находится в состоянии бесконечного сжатия и стянут в «сингулярность». Общая теория относительности Эйнштейна утверждает, что форма пространства-времени определяется распределением энергии и материи. И когда энергия и материя бесконечно сжаты, то и само пространство-время тоже сжато — и оно просто исчезает.

Как именно, можно понять, если учесть, что через долю секунды после рождения вся наблюдаемая Вселенная была не больше атома. В таких масштабах классическая физика неприменима: в микромире правят законы квантовой теории. Поэтому космологи (среди них и Стивен Хокинг) стали применять квантовую теорию, которая использовалась только для описания субатомных явлений, ко всей Вселенной в целом. Так родилась квантовая космология, названная физиком Джоном Гриббином «наиболее значительным шагом вперед в науке со времен Исаака Ньютона»*.

То, что квантовая теория (а за ней и квантовая космология) разрешает, еще более интересно, чем то, что она запрещает. А разрешает она спонтанное возникновение частиц из вакуума. Такой способ создания Нечто из Ничто дал квантовым космологам плодотворную идею: что, если сама Вселенная, по законам квантовой механики, возникла из Ничего? Тогда причина того, что существует Нечто, а не Ничто, состоит в неустойчивости вакуума.

Квантовая космология предлагает способ обойти проблему сингулярности. Классические космологи полагали, что сингулярность, предшествовавшая Большому взрыву — это что-то вроде точки с нулевым объемом. Однако квантовая теория запрещает столь точно определенное состояние, утверждая, что на самом фундамен-

тальном уровне природа обладает неизбежной неопределенностью, квантовой размытостью, которую проще всего показать на примере облачков электронов, поэтому невозможно указать точный момент возникновения Вселенной, ее начальное время.

Утверждение физиков «вакуум неустойчив» подвергается нападкам философов. Но физический вакуум и полная пустота является названием разных объектов. Однако о пустоте можно думать не только как об объекте, но и как об описании определенного состояния. Для физика «пустота» описывает такое состояние, в котором нет частиц и все математические поля равны нулю. Возможно ли такое состояние в действительности? То есть согласуется ли оно логически с наблюдаемыми в экспериментах физическими реалиями? Возможно ли создать в наполненной Вселенной полную пустоту?

Одним из наиболее глубоких принципов, лежащих в самой основе нашего квантового понимания природы, является принцип неопределенности Гейзенберга, утверждающий, что определенные пары свойств связаны друг с другом таким образом, что не могут быть точно измерены вместе. Одна такая пара переменных — координаты и импульс частицы: чем точнее вы установили положение частицы, тем менее точно вам известно значение ее импульса, и наоборот. Другой парой сопряженных переменных являются время и энергия: чем точнее вам известен промежуток времени, в течение которого произошло какое-то событие, тем меньше вы знаете об энергии, связанной с этим событием, и наоборот.

Квантовая неопределенность также запрещает точное определение значений поля и скорости изменения этого значения. Пустота, или вакуум — это состояние, в котором все значения полей постоянно равны нулю, однако принцип неопределенности Гейзенберга говорит, что если мы точно знаем значение поля, то скорость его изменения совершенно случайна, то есть не может быть равна нулю.

* Gribbin J. Q Is for Quantum. Free Press, 1998.

Таким образом, математическое описание неизменной пустоты несовместимо с квантовой механикой и квантовой космологией — точнее, пустота неустойчива, или же ее попросту не существует.

Идея, что Вселенная, содержащая сотни миллиардов галактик, могла появиться из пустоты, выглядит невероятной. Как показал Эйнштейн, любая масса представляет собой застывшую энергию. Однако огромному количеству положительной энергии, запертой в звездах и галактиках, должна противостоять отрицательная энергия гравитационного притяжения между ними. В «закрытой» Вселенной (той, которая со временем снова сожмется) положительная и отрицательная энергии должны точно уравновешивать друг друга. Другими словами, общая энергия такой Вселенной равна нулю.

Возможность создания целой Вселенной из нулевой энергии поражает воображение. С точки зрения квантовой механики Вселенная с нулевой энергией представляет собой интересную возможность. Допустим, что полная энергия Вселенной точно равна нулю. Тогда, благодаря взаимосвязи в неопределенности между энергией и временем (как утверждает принцип Гейзенберга), неопределенность во времени становится бесконечной. Другими словами, как только такая Вселенная возникнет из пустоты, то она сможет существовать вечно. Что же касается причины, по которой Вселенная возникла, то это просто квантовая вероятность. Да, это трудно понять классическому разуму. Стивен Хокинг в книге «Великий замысел» пишет: *«Если полная энергия Вселенной должна всегда оставаться нулевой и необходимо затратить энергию, чтобы создать тело, как может вся Вселенная быть создана из ничего? Вот почему должен существовать такой закон, как гравитация. Так как гравитация притягивает, то энергия гравитации является отрицательной. Необходимо произвести работу, чтобы разделить гравитационно связанную систему, такую*

*как Земля и Луна. Эта отрицательная энергия может быть сбалансирована положительной энергией, необходимой, чтобы создать материю, но все не так просто. Отрицательная гравитационная энергия Земли, к примеру, меньше, чем положительная энергия миллиардов частиц, из которых она состоит. Тело, такое как звезда, будет иметь больше отрицательной гравитационной энергии, и чем меньше она (частицы, из которых она состоит, находятся ближе друг к другу), тем больше будет ее отрицательная гравитационная энергия. Но прежде, чем отрицательной гравитационной энергии может стать больше положительной энергии вещества, звезда сколлапсирует в черную дыру, и черная дыра будет иметь положительную энергию. Вот почему пустое пространство стабильно. Тела, такие как звезды или черные дыры, не могут так просто появляться из ничего. Но целая Вселенная может!»**

С выводами Стивена Хокинга согласна и квантовая механика. Американский ученый русского происхождения Алекс Виленкин в книге «Мир многих миров» показал, что из начального состояния пустоты может спонтанно появиться крохотный кусочек наполненного энергией вакуума. Под действием отрицательного давления «инфляции» этот кусочек энергетического вакуума испытывает безудержное расширение. Через пару микросекунд он достигнет космических размеров, испустив поток света и материи, и случится Большой взрыв.

Таким образом, по мнению Виленкина, переход от Пустоты к Бытию происходит в два этапа. На первом крохотный кусочек вакуума появляется из вакуума. На втором он раздувается в наполненную материей предшественницу Вселенной, которую мы сейчас видим вокруг. На данный момент принципы квантовой механики, управляющие первым этапом, являются самыми надежными принципами в науке. Что касается теории ин-

* Stephen Hawking and Leonard Mlodinow, «The Grand Design».

фляции, которая описывает второй этап, то с момента создания в начале 80-х годов она успешно подтверждена не только теоретически, но и эмпирически — в частности, распределением реликтового излучения, оставшегося после Большого взрыва.

Что же происходит в момент Большого взрыва со временем? Общая теория относительности объединяется с квантовой теорией: искривление времени-пространства настолько велико, что все четыре измерения ведут себя одинаково. Иными словами, времени как особого параметра здесь еще нет. А если времени нет, то нет и возможности говорить о начале Вселенной во времени, что устраняет проблему творения из ничего, или Бога. Стивен Хокинг написал: «Бог не мог сотворить мир за семь дней, потому что до самого творения не было времени».

По поводу конечности мира во времени давно идут горячие споры между западными мыслителями. Аристотель считал, что космос вечен и не имеет начала во времени. В XIII веке Католическая Церковь объявила возникновение (и конечность) мира догматом веры. Хотя Фома Аквинский, проявляя приверженность к учению Аристотеля, настаивал, что с философской точки зрения это недоказуемо. Иммануил Кант утверждал, что мир без начала приводит к парадоксу: как может наступить сегодня, если до этого дня должно пройти бесконечное число дней и ночей?

Парадокс бесконечного прошлого в том, что в таком случае к настоящему моменту должен был быть совершен бесконечный ряд действий. Хотя нет ничего невозможного в совершеннии бесконечного ряда действий, если вы располагаете бесконечным временем для их совершения. Да и математически возможно совершить бесконечный ряд действий за конечное время при условии, что вы совершаете их всё быстрее и быстрее. Допустим, вы можете завершить первое действие за час, тогда второе займет у вас половину часа, третье — четверть часа, четвертое — одну восьмую часа и так далее. В этом темпе вы завершите бесконеч-

ный ряд действий всего лишь за два часа. На самом деле, каждый раз, прочитывая предложение этой статьи, вы совершаете нарушение логических законов — поскольку, как заметил античный философ Зенон, пройденное расстояние можно разделить на бесконечное число всё более крохотных интервалов. Поэтому нет ничего абсурдного в бесконечном прошлом. Теоретически вполне могла быть бесконечная последовательность дней до сегодняшнего утра — при условии, что у нас был бесконечный промежуток времени, в течение которого они могли пройти.

Есть и более радикальная версия взгляда на происхождение мира и Большой взрыв, которую отстаивает химик из Оксфорда Питер Эткинс. По словам Эткинса, «противоположности различаются направлением движения во времени». Например, -1 есть то же самое, что 1 , только движущаяся из будущего в прошлое. При отсутствии времени -1 и 1 взаимоуничтожаются, объединяясь в ноль. Время позволяет двум противоположностям отделиться друг от друга, что таким образом и отмечает появление времени. Эткинс предполагает, что именно так спонтанно зародилась Вселенная. Американский писатель Джон Апдайк был настолько поражен этой идеей, что использовал ее в романе «Сплетни Роджера» в качестве альтернативы теистическому объяснению бытия.

Герой Апдайка Крикман, показав, как Вселенная возникла из «почти Ничто», принимается объяснять ошеломленному Дейлу, что это «почти Ничто» появилось из абсолютно Ничто.

*«Представьте себе пустоту, полнейший вакуум. Однако в ней что-то есть! Что? Точки, из которых могут сложиться фигуры. Как бы облако пыли из безразмерных точек...»** В этом облаке, продолжает он, точки случайно собираются в узлы или «вмерзают» в небольшое структурированное пространство-время. А откуда взялась первозданная пыль из точек? Из

* *Updike. Picked-Up Pieces. Роман «Сплетни Роджера» в переводе Г. П. Злобина.*

абсолютного Ничто! Точка и антиточка отделяются друг от друга в пустоте, подобно +1 и -1, отделяющимся от нуля. «Вот, на месте Ничего мы имеем два объекта», — подытоживает Крикман. Антиточка — это просто точка, движущаяся назад во времени.

Безусловно, Апдайк не имел в виду, что мы слишком серьезно отнесемся к его идеям. В конце концов, их высказывает персонаж романа, причем нелепый, комический персонаж. Такая космогоническая схема образует замкнутый круг, в котором время требуется для того, чтобы появились точки, а точки нужны, чтобы возникло время.

Ученые Герман Бонди, Томас Голд и Фред Хойл предложили теорию стационарной Вселенной, в которой мир оказывался одновременно и расширяющимся, и вечным. В этой модели пустое пространство, оставленное позади всегда разбегающимися галактиками, наполняется новыми частицами материи, которые спонтанно возникают благодаря квантовым флуктуациям. Поэтому, несмотря на непрекращающееся расширение Вселенной, в ней поддерживается постоянная плотность материи: Вселенная всегда выглядит одинаково, не имея ни начала, ни конца. Примерно так, как ее описывает Хорхе Луис Борхес в рассказе «Вавилонская библиотека»: *«Я думаю, вполне логично считать, что мир бесконечен. Те же, кто считает его ограниченным, допускают, что где-нибудь в отдалении коридоры, и лестницы, и шестигранники могут по неизвестной причине кончиться, — такое предположение абсурдно. Те, кто воображает его без границ, забывают, что ограничено число возможных книг. Я осмеливаюсь предложить такое решение этой вековой проблемы: Библиотека безгранична и периодична. Если бы вечный странник пустился в путь в каком-либо направлении, он смог бы убедиться по прошествии веков, что те же книги повторяются в том же беспорядке (который, будучи повторенным, становится порядком — Порядком). Эта изящная надежда скрашивает мое одиночество»**.

* Борхес Х. Л. Сад расходящихся тропок. М., 2007. С.11.

Таким образом, сингулярность в начале Вселенной является не событием во времени, а скорее временной границей или краем. До нее никакого времени не было. Поэтому не было и времени, когда преобладало Ничто. И не было никакого «возникновения» из этого Ничто — по крайней мере, во времени. Вселенная имеет конечный возраст, хоть и существовала всегда, если под «всегда» подразумевать все моменты времени. Вековой парадокс разрешается.

Применив квантовую механику, то есть теорию «бесконечно малого мира», к огромным пространствам Вселенной, физики приходят к выводу, что Вселенная имеет не одну историю, как в классической картине мира, но все возможные истории существуют одновременно. Однако мы присутствуем в той конкретной вселенной, где возможно присутствие человека — а значит, все законы этой вселенной подстроены под возможность существования планет, жизни, разумной жизни, и именно такой формы жизни, и из всех предьсторий выбираются те, которые приводят к появлению человека. Но «привилегия», дарованная человеку в этой вселенной, не должна, как это было в древности, подводить нас к мысли об уникальности нашего мира.

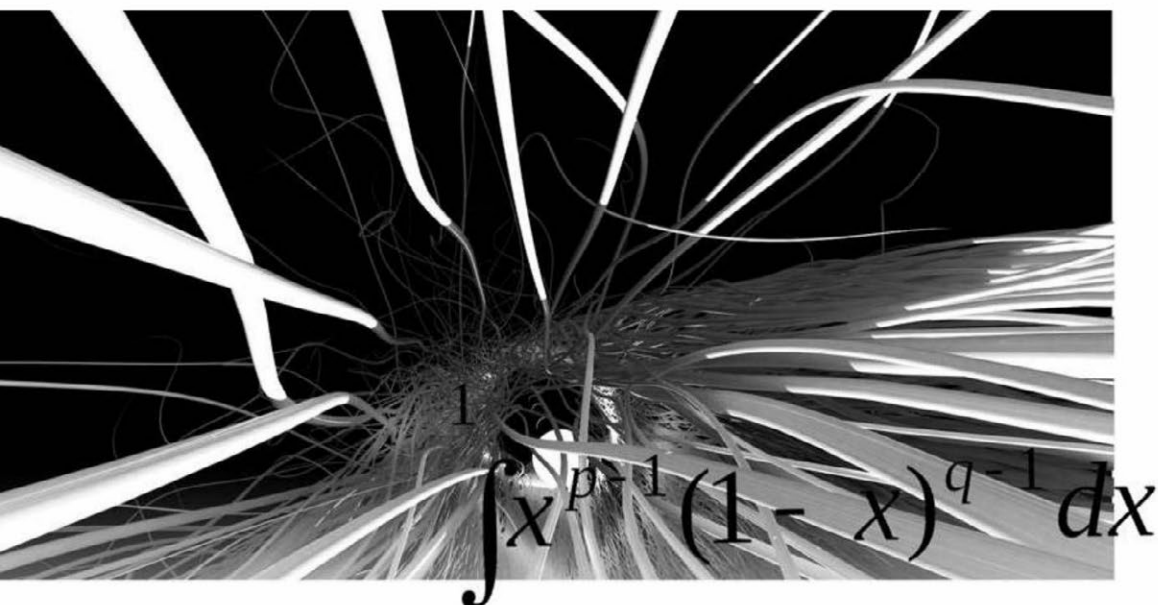
Стивен Хокинг в книге «Краткая история времени» написал: *«Открытие полной единой теории всего, может быть, и не будет способствовать выживанию и даже никак не повлияет на течение нашей жизни, но уже на заре цивилизации людям не нравились необъяснимые и несвязанные между собой факты. И они страстно желали понять тот порядок, который лежит в основании нашего мира. По сей день мы страстно желаем узнать, почему мы здесь оказались и откуда взялись. Наша конечная цель никак не меньше, чем полное описание Вселенной, в которой мы живем»***.

** Хокинг С. Краткая история времени. От Большого взрыва до черных дыр.



Истоки и плоды

Теории
струн



Габриеле Венециано (англ. Gabriele Veneziano; род. 1942, Флоренция, Италия) — физик-теоретик, основатель Теории струн.

Между 1968 и 1972 годами он работал в MIT и ЦЕРНе. В 1972-м стал профессором физики в институте Вейцмана, а в 1976-м ему была предложена должность в теоретическом отделе ЦЕРНа (Женева, Швейцария), где он проработал более 30 лет. В настоящее время возглавляет кафедру физики элементарных частиц, гравитации и космологии в Коллеж де Франс в Париже.

Летом 1968 года, будучи сотрудником ЦЕРНа, Габриеле Венециано опубликовал статью, озаглавленную «Construction of a crossing-symmetric, Regge behaved amplitude for linearly-rising trajectories». В этой работе он попытался объяснить сильное взаимодействие, но его работа стала отправной точкой исследований Теории струн.

Интервью с Г. Венециано опубликовано в «CERN Courier», 2018, № 9. Редакция «З—С» благодарит «Курьер ЦЕРН» за разрешение опубликовать перевод интервью и академика В. А. Рубакова — за помощь в переводе.

— Габриеле, что привело вас к работе 1968 года, благодаря которой вы получили наибольшую известность?

— В середине 1960-х годов мы, физики-теоретики, застопорились в попытках понять сильное взаимодействие. У нас был пример работающей релятивистской квантовой теории: КЭД (квантовая электродинамика) — теория взаимодействия электронов и фотонов, но казалось невозможным использование такого подхода для сильного взаимодействия. Одна из причин — величина сильного взаимодействия по сравнению с электромагнитным. Гораздо большее опасение внушало то, что было так много (и постоянно росло в количестве) различных видов адронов, что мы пребывали в недоумении в связи с теорией поля — как мы можем справиться с таким обилием различных состояний в рамках, подобных КЭД? Сейчас мы знаем, что это можно сделать, и эта теория названа квантовой хромодинамикой (КХД)*. Но тогда все было не так ясно. Весьма нетривиальный переход от КЭД к КХД означал проявить смелость написать теорию для сущностей (кварков), которые до того никто не наблюдал в экспериментах.

В то время никто не был готов совершить такой логический прыжок, потому мы попробовали нечто другое: S-матричный подход. S-матрица, позволяющая связать начальное и конечное состояния квантово-механического процесса, позволяет непосредственно рассчитать вероятности процессов рассеяния без явного использования квантовой теории поля, такой как КЭД. Вот почему это выглядело более многообещающим. Это также выглядело очень условным, но, в конце концов, привело к чему-то еще более революционному, чем КХД — идее о том, что адроны на самом деле являются струнами.

* Квантовополевая теория сильного взаимодействия кварков и глюонов, построенная по образу квантовой электродинамики на основе «цветовой» калибровочной симметрии (Прим. ред.).

— Это правда, что ваш момент «Эврика» случился тогда, когда вы наткнулись на бета-функцию Эйлера в учебнике?

— Совсем нет! Я использовал подход «снизу вверх», чтобы понять сильное взаимодействие. Основная идея была навязать S-матрице свойства, сейчас известные как гипотеза дуальности Долена, Хорна и Шмидта. Это позволяет связать два явно различных процесса, дающих вклады в элементарную реакцию, например, $a+b \rightarrow c+d$. В одном процессе $a+b$ сливаются воедино в метастабильном состоянии (резонансе), а спустя определенное время существования распадаются на $c+d$. В других процессах пара $a+c$ обменивается виртуальной частицей с парой $b+d$. Оба эти процесса должны быть учтены независимо в квантовой электродинамике, поскольку они соответствуют двум различным диаграммам Фейнмана, в то время как, согласно гипотезе дуальности Долена, Хорна и Шмидта, каждый из них достаточен для полного описания в случае сильного взаимодействия. О гипотезе дуальности Долена, Хорна и Шмидта я услышал от Мюррея Гелл-Манна во время летней школы в Эриче (Италия) в 1967 году, где он высказался, что гипотеза дуальности Долена, Хорна и Шмидта может привести к «дешевой самонастройке»** сильного взаимодействия. Слова, сказанные великим физиком, очень мотивировали меня. Я был на полпути в работе над своей диссертацией в институте Вейцмана в Израиле. Осенью того же года была сформирована группа из четырех человек. Она состояла из Марко Адемолло, Гектора Рубинштейна, Мигеля Вирасоро и меня, трудившихся в институте Вейцмана. Мы интенсивно работали в течение 8—9 месяцев в попытках найти (по-видимому, не очень-то) дешевую самонастройку для наиболее подходящей реакции. Мы получили весьма обнадежи-

** В оригинале «бутстрап». Этот термин закреплён и в русскоязычной научной литературе. (Примеч. В. А. Рубакова).

вающие результаты. Я чувствовал, что существует простое точное решение. Это решение оказалось бета-функцией Эйлера.

— Но публикация 1968 года имела одного автора?

— Да. Подготовительная работа, проделанная нашей четверкой, сыграла решающую роль, но открытие, что бета-функция Эйлера была точной реализацией дуальности Долена, Хорна и Шмидта, принадлежит исключительно мне. Это произошло приблизительно в середине июня 1968 года, непосредственно перед тем, как я отправился на корабле из Хайфы в Венецию, а затем в ЦЕРН, где я пробыл весь июль. К тому времени наша четверка уже распалась: Рубинштейн был на пути в Нью-Йоркский университет, Вирасоро в университет Мэдисон, штат Висконсин, через Аргентину, Адемолло вернулся во Флоренцию перед вторым годом в Гарварде. Я же продолжал работу над этой идеей самостоятельно, сначала на борту корабля, потом, до конца июля, в ЦЕРНе, затем, поощряемый Серджио Фубини, я решил отправить рукопись в журнал «Il Nuovo Cimento».

— Была ли уже понятна значимость этой работы?

— Что ж, формула имела множество интересных особенностей, но реакция физического сообщества меня шокировала. Сразу после того, как отправил рукопись, я уехал в отпуск на четыре недели в Италию и не думал о ней. В конце августа 1968-го я принял участие в конференции в Вене и обнаружил, к своему большому удивлению, что эта статья уже широко известна в научной среде и упоминается в нескольких докладах. Я отправил рукопись для публикации, и был приглашен рассказать об этом на одной из сессий конференции. Любопытно, что я ничего не помню об этом событии, но моя жена помнит, как я ей рассказывал об этом. Был даже свидетель, покойный Дэвид Олив, который написал, что мое выступление изменило его жизнь. Это было «точным попаданием», потому что модель ответила

сразу на несколько вопросов, но тогда было совершенно не очевидно, что она имеет какое-то отношение к струнам, не говоря уже о квантовой гравитации.

— Как совершился переход к «теории струн»?

— Первые намеки, что физическая модель для адронов могла обосновать мое математическое предположение, появились после того, как оно было должным образом обобщено (применительно к процессам с участием произвольного числа сталкивающихся частиц), и весь спектр адронов, который оно подразумевало, был раскрыт (Фубини и мной, и, независимо от нас, Коркутом Бардаки и Стэнли Мандельштамом). Удивительно, но оказалось, что он очень похож на экспоненциально растущий (по массе) спектр, постулированный почти десятилетием ранее теоретиком ЦЕРН Рольфом Хагедорном, и, по крайней мере, упрощенно, подразумевает абсолютный верхний предел температуры (так называемая температура Хагедорна*).

Спектр совпадает со спектром бесконечного набора гармонических осцилляторов и, таким образом, напоминает спектр квантованной вибрирующей струны с ее бесконечным числом высших гармоник. Хольгер Нильсен и Ленни Саскинд независимо друг от друга предложили картинку струны (или резинки). Тем не менее, как всегда, дьявол кроется в деталях. Примерно в конце десятилетия Ёчиро Намбу (и независимо от него Гото) дал первое правильное определение классической релятивистской струны, но Годдарду, Голдстоуну, Ребби и Торну потребовалось несколько лет, до 1973 года, чтобы доказать, что правильное применение квантовой механики к струне Намбу — Гото точно воспроизвело вышеупомянутое обоб-

* Температура Хагедорна — температура в теоретической физике, при которой адронная, то есть обычная, материя теряет стабильность и, по современным представлениям, превращается в кварковую материю; как таковую ее можно рассматривать как «точку кипения» адронной материи (Прим. ред.).

щение моей первоначальной работы. Эта работа также включала определенные условия согласованности, которые уже были найдены, в частности, наличие безмассового состояния со спином 1 (Вирасоро) и необходимость в дополнительных пространственных измерениях (из работы Ловлейса). С этого момента стало ясным, что оригинальная модель имеет чисто физическую интерпретацию адронов как квантовых струн. Некоторые детали были явно ошибочны: одна из наиболее поразительных особенностей сильного взаимодействия — это его близкодействующая природа*, тогда как безмассовое состояние производит дальнедействующее взаимодействие. То, что модель несовместима с тремя пространственными измерениями (наш мир!), также смущало, но люди продолжали надеяться.

— *То есть, Теория струн была открыта случайно?*

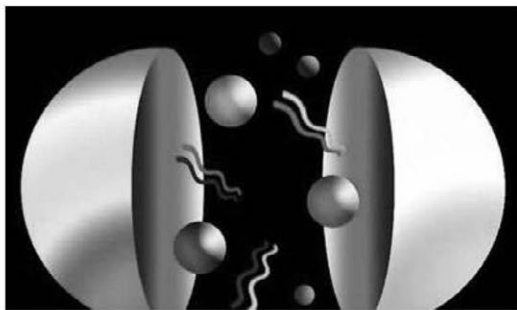
— На самом деле, нет. Строго говоря, обнаружение того, что адроны являются струнами, было немалым достижением для тех дней. Это была не совсем та струна, которую мы сейчас связываем с невылетанием кварков в КХД. Действительно, последнее свойство столь сложно, что только сверхмощным компьютерам удалось пролить свет на него спустя несколько десятилетий. А posteriori**, фактом является то, что изучение адронных явлений подтолкнуло нас к открытию Теории струн, и это не было ни совпадением, ни случайностью.

— *Когда стало ясно, что струны предлагают последовательную теорию квантовой гравитации?*

— Та смелая идея была высказана еще в 1974 году в работе Джоэля Шерка и Джона Шварца. Столкнувшись с тем, что безмассовое состояние струны со спином 1 отказалось становиться массивным (в теории струн нет под рукой механизма Брута-Энглера-Хиггса!), и что даже безмассовая струна со спи-

* В пределах атомного ядра (*Прим. ред.*).

** Знание, полученное из предыдущего опыта (*лат.*)



Кварки

ном 2 должна была быть частью спектра струн, они утверждали, что эти состояния следует отождествлять с фотоном и гравитоном, то есть с носителями электромагнитного и гравитационного взаимодействий соответственно. Другие частицы со спином 1 могут быть сопоставлены с глюонами КХД или с W и Z бозонами слабого взаимодействия. Теория струн, таким образом, в дальнейшем может стать теорией всех взаимодействий, на более глубоком уровне микромира. Для того, чтобы описать сами кварки, электрон, мюон и нейтрино, по сути, все элементарные частицы, как струны, необходимо характерный масштаб адронной струны ($\sim 10^{-13}$ см) уменьшить на двадцать порядков ($\sim 10^{-33}$ см, то есть знаменитая Планковская длина).

Кроме того, оказалось, что серьезный недостаток старой струны (а именно ее «мягкость», означающая, что столкновения струн не могут привести к событиям с большими углами отклонения) был большим плюсом для предложения Шерка — Шварца. В то время, как данные показывают, что жесткие адронные столкновения происходят с большими вероятностями, в соответствии с предсказаниями КХД, мягкость теории струн может освободить квантовую гравитацию от ее проблемных ультрафиолетовых расходимостей*** — осно-

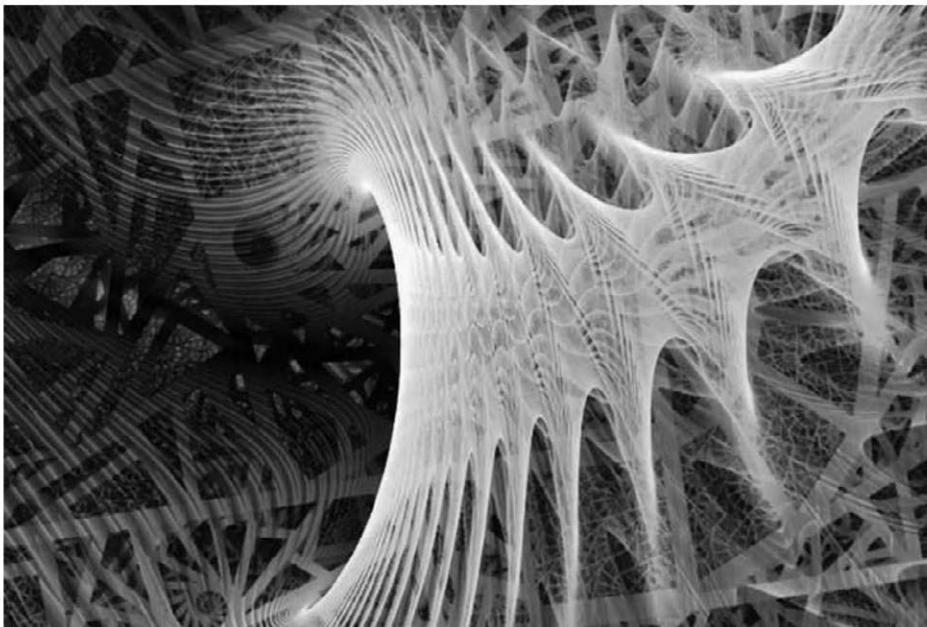
*** Ультрафиолетовая расходимость в квантовой теории поля — один из вариантов бесконечных выражений, возникающий в квантовой теории поля до применения процедуры перенормировки. Технически, ультрафи-

го препятствия для формулировки последовательной теории квантовой гравитации.

— Вы тогда обратили свое внимание на теорию струн?

— Не сразу. Я тогда по-прежнему интересовался пониманием сильного взаимодействия и работал над некоторыми аспектами пертурбативной и не-пертурбативной КХД и их суперсимметричным обобщением. Боль-

штин с другим фактом природы: нарушением четности в слабых взаимодействиях. Этот прорыв снова вывел Теорию струн в топ наиболее важных, и с тех пор число поклонников Теории струн неуклонно растет, особенно среди более молодой части теоретического сообщества. С тех пор произошло несколько научных «революций», связанных с именами Виттена, Полчинского, Мальдасены



Квантовая гравитация

шинство исследователей держались в стороне от Теории струн в течение следующего десятилетия 1974—1984 годов. Как вы помните, Стандартная Модель только что воплотилась в жизнь, и очень многое делалось в попытке извлечь из нее прогнозы и проверить ее. Я вернулся к Теории струн в 1984 году после революционной работы Грина и Шварца. Они обнаружили способ примирить Теорию

олетовая расходимость получается из петлевых фейнмановских диаграмм, при вычислении которых возникает интеграл по четырехимпульсу в замкнутой петле. Этот интеграл часто расходится на верхнем пределе, то есть в пределе очень больших энергий, отсюда и слово «ультрафиолетовая» (Прим. ред.).

и многих других. Потребуется слишком много времени, чтобы отдать должное всем этим значимым событиям. Лично я довольно давно заинтересовался применением новой Теории струн к ранней космологии.

— Была ли ваша работа 1991 года первым связующим звеном между Теорией струн и космологией?

— Я думаю, что на тот момент была, по крайней мере, одна модель Бранденбергера и Вафа, которая пыталась объяснить, почему наша Вселенная имеет только три больших пространственных измерения, но моя работа, безусловно, была одной из первых. В 1991 году я (и независимо от меня Аркадий Цейтлин) понял, что

уравнения струнной космологии, в отличие от уравнений Эйнштейна, допускают симметрию (также называемую дуальностью!), которая связывает замедляющееся расширение с ускоряющимся. Это, как я думал, могло бы стать естественным способом получить инфляционную космологию, которая уже была известна с 1980-х годов, в Теории струн без привлечения специальной частицы «инфлатона».

Проблема заключалась в том, что замедляющееся решение, казалось бы, имело сингулярность Большого взрыва в прошлом, в то время как (дуальное) ускоряющееся решение имело сингулярность в будущем. Но это имело бы место лишь в том случае, если можно было пренебречь эффектами, связанными с конечным размером струны. Многие соображения, включая уже упоминавшийся верхний предел температуры, наводят на мысль, что в теории струн действительно нет сингулярностей, подобных Большому взрыву. Если это так, два связанных дуальностью решения можно было бы без проблем объединить, чтобы обеспечить то, что я назвал «сценарием до Большого взрыва», характеризующимся отсутствием начала времени. Я думаю, что модель (далее разработанная Маурицио Гасперини и многими другими) все еще жива, по крайней мере, до тех пор, пока первичная поляризация В-моды не обнаружена в космическом микроволновом фоне, поскольку она, по прогнозам, незначительна в этой космологии.

— *Вы изучали другие аспекты нового воплощения Теории струн?*

— Вторая линия исследований, связанных со струнами, которой я следую с 1987 года, касается проведения мысленных экспериментов с целью понять, что Теория струн может дать квантовой гравитации в духе того, что делалось в первый период квантовой механики. В частности, сначала с Даниэле Амати и Марчелло Чиафалони, а затем и со многими другими я изучал столкновения струн при транс-планковских энергиях ($> 10^{19}$ ГэВ), которые не могут быть достигнуты в ускорителях, созданных человеком, но могли существовать в ранней Вселенной. Я все

еще работаю над этим. Одним из результатов этого исследования, которое стало довольно популярным, является обобщение принципа неопределенности Гейзенберга, подразумевающего минимальное значение Δx порядка размера струны.

— *Спустя 50 лет исследований стала ли Теория струн ближе к описанию реальности?*

— Люди говорят, что Теория струн не делает предсказаний, но это просто неправда. Она пока является единственной теорией, которая предсказывает размерность пространства; она предсказывает на древесном уровне* (самый низкий уровень приближения для релятивистской квантовой теории) множество безмассовых скаляров, которые угрожают принципу эквивалентности (универсальности свободного падения), который к настоящему времени очень хорошо проверен. Если бы мы могли доверять этому предсказанию, полученному на древесном уровне, теория струн уже была бы фальсифицирована. Но то же самое можно сказать и о КХД, поскольку на древесном уровне эта теория предполагает наличие свободных кварков. Другими словами: новая теория струн, как и старая, может быть фальсифицирована экспериментами на большом расстоянии, если мы можем доверять уровню приближения, при котором она решается. С другой стороны, чтобы проверить теорию струн на малом расстоянии, лучше всего использовать космологию. Вокруг (то есть, до или вскоре после) Большого взрыва Теория струн, возможно, оставила свой отпечаток в ранней Вселенной, и ее последующее расширение может привести их к макроскопическим масштабам сегодня.

— *Что вы думаете о продолжающихся дебатах о научной жизнеспособности?*

* В оригинале «Tree-level prediction» предсказание, сделанное в древесном приближении, это самое простое и грубое приближение в квантовой теории поля. В этом приближении учитываются только фейнмановские диаграммы без петель, они выглядят как деревья с ветками (если диаграмма не очень простенькая). (Примеч. В. А. Рубакова).

собности ландшафта или «болота» решений теории струн?

— Я не эксперт по этому вопросу, но недавно я услышал (на конференции, посвященной струнам в 2018 на Окинаве, Япония) выступление Кумруна Вафы на эту тему, в котором утверждается, что решение KKLT (которое стремится объяснить аномально малую величину энергии вакуума, как предложено в 2003 году Каллош, Качру, Линде и Триведи) «попало в болото», что означает, что оно не жизнеспособно на фундаментальном уровне квантовой гравитации. За этим последовала бурная дискуссия, и я не могу судить, кто прав. Я могу только догадываться, что отсутствие метастабильного вакуума де-Ситтера делает предпочтительными модели квинтэссенции, подобные тем, которые я исследовал с Тибо Дамуром несколько лет назад, и это может означать интересные малые (но, возможно, обнаружимые) нарушения принципа эквивалентности.

— Каково восприятие струн вне научного сообщества?

— Некоторые популярные обзоры Теории струн, появившиеся в последние годы, были довольно поверхностными. Когда люди говорят, что Теория струн не может быть доказана, это несправедливо. Обычный аргумент в том, что вам нужны невероятно высокие энергии. Но, как я уже сказал, новое воплощение Теории струн может быть фальсифицировано, как и его предшественник; вскоре после его появления стало ясно, что КХД является лучшей теорией. Возможно, то же самое случится с сегодняшней Теорией струн, но я не думаю, что на данный момент есть серьезные альтернативы. Очевидно, что энтузиазм молодых людей все еще существует. Научное сообщество нетипично молодое — средний возраст участников конференции по Теории струн намного ниже, чем, например, для конференции по физике КХД или электрослабой физике. Что мотивирует молодых теоретиков? Возможно, математическая красота Теории струн, а может быть и возможность выполнения множества различных вычислений, публикации их и получения большого количества ссылок.

— Какой совет вы бы дали молодым теоретикам, выходящим на поле науки?

— Я сожалею о том, что большинство молодых ученых, изучающих Теорию струн, не обращаются к нерешенным вопросам физики, связанным с квантовой гравитацией, таким как какова судьба первоначальной сингулярности классической космологии в Теории струн. Это очень сложные проблемы, и в наши дни молодые люди не могут позволить себе потратить пару лет на одну такую проблему, не публикуя несколько статей. Когда я был молод, мне не было дела до модных теорий, я просто «следовал за своим носом» и рисковал, что в итоге окупилось. Сегодня это сделать гораздо сложнее.

— Как изменилась теоретическая физика элементарных частиц с 1968 года?

— В 1968 году у нас было много данных, но не было хорошей теории для объяснения слабых и сильных взаимодействий. Необходимо было проделать огромную работу, и в течение нескольких лет была создана Стандартная модель. Сегодня у нас все еще есть все та же Стандартная модель, и мы всё еще ждем некоторого кризиса знания, который возможен благодаря результатам интереснейших экспериментов, которые проводятся в ЦЕРН и в других местах. Стивен Вайнберг говорил, что физика процветает на кризисах. Кризисы сегодня в большей степени связаны с космологией (темная материя, темная энергия), квантовой механикой черных дыр и действительно объединяют наше понимание физики на всех масштабах, от Планковской длины до нашего космологического горизонта, двух масштабов, которые разнесены на 60 порядков величины друг от друга. Понимание такой иерархии (вместе со значительно меньшей иерархией Стандартной модели) представляет, на мой взгляд, самую большую теоретическую проблему для физики XXI века.

*Беседу вел Мэтью Чалмерс,
редактор «CERN Courier».
Опубликовано в CERN Courier
2018, № 9.*

*Перевод с английского
Надежды Алексеевой*

Капли из первичной материи Вселенной

Международная группа физиков с участием российских ученых, работающая на коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC – Relativistic Heavy Ion Collider), заявила о создании первых «полноценных» капель кварково-глюонной плазмы — аналогов материи, существовавшей во Вселенной во время Большого взрыва.

Как заявил Джейми Нагл из университета Колорадо в Боулдере (США), исследование — кульминация целой серии экспериментов, в рамках которой исследователи попытались найти способ управлять формой капель кварково-глюонной плазмы. Ученые вплотную приблизились к ответу на вопрос — насколько небольшой может быть минимальная порция первичной материи Вселенной.

Так называемая кварково-глюонная плазма, или «кваргма», представляет собой материю, «разобранную» на кварки и глюоны, обычно удерживаемые внутри протонов, нейтронов и других частиц сильным ядерным взаимодействием. Для «освобождения» кварков и глюонов необходимы гигантские температуры и энергии, которые, по современным представлениям, существовали в природе только в момент Большого взрыва. По этой причине в природе не существует примеров этой материи, которые можно было бы изучать при помощи телескопов или других приборов.

Более десяти лет назад физики выяснили, что такие условия можно воспроизвести, лишь сталкивая достаточно тяжелые ионы друг с другом при помощи мощных ускорителей частиц. Однако, несколько лет назад они получили первые намеки на то, что это не так, изучая результаты экспериментов на двух коллайдерах — Большом адронном коллайдере (БАК) и RHIC. Оказалось, что «первичная материя Вселенной» образуется при столкновениях одиночных протонов и ионов свинца. Год назад ученые пошли дальше и выяснили, что этого же можно добиться, сталкивая одиночные протоны.

Эти открытия заставили физиков задуматься о том, возникали ли реальные об-

лачка первичной материи Вселенной после столкновений ионов и протонов или же там появляется нечто совершенно иное. Нагл и его коллеги придумали остроумную методику для проверки этих открытий, опирающуюся на уникальные свойства кваргмы. Как полагают в настоящее время ученые, первичная материя Вселенной ведет себя подобно сверхтекучей идеальной жидкости, обладающей нулевой вязкостью и некоторыми другими аномальными свойствами. В случае с экспериментами на БАК и RHIC это должно проявляться в том, что изначальная форма капли «кваргмы» не будет случайной. Она, как отмечают исследователи, будет зависеть от того, как выглядели ее прародители. К примеру, протон похож на круг, дейтерий — на эллипс, а гелий-3 — на треугольник. Соответственно, если капли первичной материи Вселенной действительно возникают при их столкновениях, то они будут похожи на эти три фигуры.

Руководствуясь этой идеей, Нагл и его коллеги провели серию экспериментов на RHIC, сталкивая условно круглое ядро золота с тремя этими веществами. Когда в детекторе PHENIX рождалось очередное облачко «кваргмы», ученые следили за его расширением и пытались восстановить его оригинальную форму, используя компьютерные модели. Во всех шести экспериментах, которые провели ученые, реальные замеры совпали с предсказанными геометрическими формами. Изначальная и финальная форма этих облачков материи очень хорошо укладывалась в результаты расчетов, что подтвердило существование капель кварково-глюонной плазмы.

Подтверждение их существования, в свою очередь, помогло физикам проверить две самых популярных теории, объясняющих то, как вела себя первичная материя Вселенной во время Большого взрыва. Сторонники первой предполагают, что движения и взаимодействия кваргмы описываются обычными законами гидродинамики. Их оппоненты считают, что поведением этой экзотической формы материи

управляют квантовые процессы, в первую очередь — взаимодействия между глюонами. Эти квантовые процессы не будут сильно влиять на изначальную форму капель, но поменяют то, как она станет расширяться при превращении в эллипс или треугольник.

В частности, «квантовая» теория говорит о том, что облачка, возникшие в результате столкновения атома золота и протона, а также золота и дейтерия, будут расширяться одинаковым образом. Но эта идея

оказалась ошибочной — форма и того, и другого типа капель «квaгмы» менялась по разным сценариям.

Сейчас физики проводят дополнительные эксперименты, в рамках которых пытаются измерить температуру этих капель. Если она окажется достаточно высокой, возможность существования самых мельчайших порций первичной материи Вселенной будет окончательно доказана.

Исследование представлено в журнале «Nature Physics».

Гелий помог воссоздать «первичную материю Вселенной»

Российские и финские физики обнаружили у сверхтекучего жидкого гелия-3, самой холодной жидкости на Земле, необычные квантовые структуры, напоминающие по своим свойствам первичную материю Вселенной.

Йере Мякинен из университета Аалто (Финляндия) и его коллеги под руководством профессора Григория Воловика из Института теоретической физики РАН выяснили, что аналоги первичной материи Вселенной, кварково-глюонной плазмы, можно получить за счет сильного охлаждения. Ученые уже много десятилетий изучают свойства сверхтекучего гелия-3 — экзотической квантовой жидкости, возникающей при охлаждении этого газа до сверхнизких температур. Ее необычные свойства проявляются в том, что сверхтекучий гелий нельзя «вскипятить», почти невозможно взболтать, и при этом он является сверхпроводником и может двигаться по любой поверхности без трения. Вдобавок, внутри него возникают загадочные квантовые вихри, особым образом влияющие на манеру вращения жидкости, о природе которых ученые продолжают спорить до сих пор.

Российские и финские физики изучали свойства одной из подобных структур, так называемых полуквантовых воронок — миниатюрных вихрей из атомов гелия, чьим движением управляют исключительно законы квантового мира. Для этих наблюдений они создали своеобразный миниатюрный бассейн, разделенный на мно-

жество миниатюрных «дорожек», заполненных обычным гелием-3. Раскрутив этот контейнер, ученые начали охлаждать жидкость, благодаря чему в ней постепенно возникли полуквантовые воронки. По мере дальнейшего охлаждения, гелий-3 несколько раз переживал фазовые переходы — он резко менял свою структуру и свойства, так как характер взаимодействия между его атомами менялся из-за падения температуры. Физиков интересовало, что произойдет с квантовыми вихрями во время подобных «перестроек». К их удивлению, полуквантовые воронки не исчезли, как это предсказывала теория, а стали частью нового типа структур, которые ученые назвали «нетопологическими стенами». Они представляют собой воображаемые линии, разбивающие жидкий гелий на несколько зон с разными магнитными свойствами.

Подобные свойства, как отмечают Воловик и его коллеги, нехарактерны для всех типов материи, существующих сегодня. С другой стороны, такие квантовые стены могли существовать в первичной материи Вселенной в первые мгновения после Большого взрыва. Если это действительно так, то эти объекты должны были сыграть ключевую роль в том, как материя была распределена по Вселенной и как возникли все современные скопления галактик и «зоны пустоты» в пространстве между ними.

Публикация в журнале «Nature Communications».