

idb. КНИГА НОВОСТЕЙ

W – теория про...

10:00 Термодинамика эволюции, или 4 женщины

[9♥] Рената, или Квантовая самоорганизация

[Что говорят женщины](#) [80]

[Три источника КДТ](#) [81]

[Пространство под микроскопом](#) [82]

[Мосты и ZZ-браны](#) [83]

[7♠] Лиза, или Красота бран

[Раздвоение имеет значение](#) [84]

[Замыкая круг](#) [85]

[Двуделение с деформированной геометрией](#) [86]

[Эволюция бран с элементами мистики](#) [87]

[8♣] Ева, или Ясновидение среди струн

[Пещера и слон](#) [88]

[Фазовые переходы с переворотом](#) [89]

[Без паники – тахионы](#) [8A]

[Тахионный кристалл](#) [8B]

[8♠] Фотини, или Эволюция гравитации

[Петли и сети](#) [8C]

[Механика нелокальности](#) [8D]

[Эволюция без шума](#) [8E]

[Время без пространства](#) [8F]

N	0	1	E
00:00	00:01	01:00	01:01
00:10	00:11	01:10	01:11
10:00	10:01	11:00	11:01
10:10	10:11	11:10	11:11
W	0	1	S

<http://KNIGANEWS.ORG>

[9♥] Рената, или Квантовая самоорганизация

Что говорят женщины [80]

В силу каких-то важных, но пока неясных для человека причин, вселенная живет и функционирует по очень четким математическим правилам. В большинстве своем ученые давно уже с этим свыклись, однако некоторые все еще продолжают поражаться удивительному факту. Чем больше теоретикам удается проникать в глубины абстрактных, казалось бы, математических теорий, тем больше наука узнает о закономерностях, управляющих процессами и явлениями в природе. А нередко бывает и наоборот – обнаруживаемые в теоретической физике результаты дают энергичный толчок к развитию очень мощного и красивого математического аппарата, уже абсолютно никак, казалось бы, не связанного с физической наукой и наблюдаемыми в природе явлениями.

В рамках представленной здесь модели все подобные странности объясняются довольно просто – как естественные следствия для вселенной типа «голографическая виртуальная реальность», порождаемая на основе согласованных и выверенных практикой математических программ. Иначе говоря, тут изначально подразумевается существование еще одной – идеальной – реальности из математических форм и структур, выступающих в роли шаблонов для всех объектов окружающего мира и для всевозможных взаимодействий между ними. Идея эта, как известно, далеко не нова, и философской традицией обычно связывается с именем Платона.

В частности, именно у Платона, можно напомнить, пятиугольная структура правильного многогранника-додекаэдра виделась в качестве изначального шаблона, по которому построено мироздание. Примечательно, что подобные идеи имели хождение в просвещенной части Древней Греции и до появления платоновских трудов. Известно, к примеру, что среди пифагорейцев существовал особый способ распознать в незнакомце «своего» – протянуть ему в знак приветствия яблоко. И если человек разрезал плод не вдоль черенка, как все, а поперек, чтобы на срезе обозначилась пятиконечная звезда семян, то этим он демонстрировал и свою принадлежность к пифагорейской школе, и приобщенность к ее знаниям о скрытых тайнах природы.

Пример этот хорош тем, что иллюстрирует сразу два важных факта. Во-первых, показывая мощь человеческой интуиции, способной постигать весьма нетривиальные вещи при минимальном уровне научных познаний. А во-вторых, демонстрируя потрясающую ограниченность формальной науки – коль скоро геометрия додекаэдра (в его более актуальной 4-мерной форме додекаэдрического пространства Пуанкаре) по сию пору так и продолжает оставаться как бы непостигнутой тайной мироздания. Точнее, тайной, почему-то предназначенной лишь для крайне узкого круга посвященных.

#

К счастью, многие другие открытия и достижения древнегреческих мыслителей получили куда большую известность и в сегодняшней науке развиты до грандиозных масштабов. Здесь особый интерес представляет одно из таких открытий, на современном языке именуемое «эквивалентность описаний». То, что два существенно разных, казалось бы

4 подхода – исследование свойств фигур и чисел (иными словами, геометрия и алгебра) – позволяют с разных сторон изучать одни и те же объекты, эллинские мудрецы не только прекрасно знали, но и эффективно использовали. Алгебраические уравнения, к примеру, решая с помощью фигур-чертежей, а особые свойства чисел фиксируя в их геометрических названиях: треугольное число, квадратное число и тому подобное.

Идея эквивалентных описаний на сегодняшний день чрезвычайно популярна в физике. С помощью существенно иных, но доказуемо эквивалентных математических аппаратов этот метод позволяет отыскивать удивительно простые и элегантные решения для задач, которые при прочих подходах представляются чрезвычайно сложными или вообще

5 неразрешимыми. Одним из самых впечатляющих, пожалуй, тому примеров во второй половине XX века стало открытие уравнений нелинейной динамики или детерминированного хаоса, указавших на очень красивое объяснение непостижимому прежде противоречию между вторым законом термодинамики и очевидными процессами усложняющейся эволюции во вселенной.

Второй закон, как все знают, неумолимо диктует, что всякая сложная структура в замкнутой системе с течением времени неизбежно должна распадаться до наиболее вероятного хаотического состояния, лишенного

6 какой-либо упорядоченности. Однако за миллиарды лет своей эволюции вселенная превратилась отнюдь не в хаос. Даже не принимая во внимание такую в высочайшей степени сложную конструкцию, как человек (тоже немаловажная часть вселенной), достаточно легко заметить общие процессы постоянного усложнения структур в окружающем мире.

Элементарными примерами такого рода могут служить повсюду наблюдаемые в природе процессы образования замысловатых, самоподобных и бесконечно повторяющихся структур фрактальной геометрии: в форме облаков и в изломах береговых линий, в причудливых морозных узорах на стекле, в характерном рисунке веток деревьев и так

7 далее. Как установили математики, по сути дела одни и те же нелинейные дифференциальные уравнения детерминированного хаоса описывают механизмы самоорганизации в метеорологии и лазерной физике, в гидродинамике и кинетике химических реакций, в биологических и даже рыночных, наконец, процессах. Важнейшим условием, необходимым для поддержания процессов самоорганизации, является требование незамкнутой диссипативной системы – чтобы она получала энергию извне и рассеивала ее в окружающее пространство.

##

Понятно, какой вывод наиболее естественно следует из этого для наблюдаемой человеком вселенной – что и она в целом не может быть

8 замкнутой системой, получая энергию откуда-то еще... Однако столь простая и очевидная идея большинству ученых почему-то очень не нравится и озвучивается довольно редко.

Вместо этого то и дело предпринимаются попытки объяснения мироздания на основе замкнутой модели. Мощный аппарат современной математики развит уже до такой степени, что с помощью специально подобранных формул и подгонки свободных параметров в уравнениях стало возможным обосновать практически любую теорию, придумываемую человеком. Беда в том, что в результате даже общепринятые в науке теоретические модели нередко противоречат друг другу.

Физика на сегодняшний день представляет собой объединение областей, которые в одних местах стыкуются довольно хорошо, в других более или менее удовлетворительно, но в некоторых местах – просто никак. Ярчайшим тому примером является полная пока что несовместимость двух главных физических теорий – квантовой физики и общей теории относительности.

Для разрешения фундаментальной проблемы с объединением квантовой теории и гравитационного взаимодействия, получившей общее название «квантовая гравитация», учеными ведутся исследования на самых разных направлениях. Одни продолжают искать решение в традиционном русле, все еще надеясь на непротиворечивое «слияние двух фундаментов» – Стандартной Модели и эйнштейновской ОТО. Другие же, причем в явном большинстве, разрабатывают существенно иные подходы, вроде теории струн, петлевой квантовой гравитации, теории твисторов и так далее.

###

Случилось так, что целый ряд наиболее интересных идей в этой области за последние годы выдвинули теоретики-женщины. Имеет смысл подчеркнуть данный факт, коль скоро известно, что относительная доля ученых женского пола в точных науках, и особенно в физике-математике, пока еще сильно уступает доле мужчин. Хотя именно женщинам – в силу присущей им более чувствительной интуиции, быть может – нередко удается выдвигать особо замечательные идеи.

О нескольких таких открытиях следует рассказать подробнее. Потому что они не только значительно продвигают соответствующие направления исследований в квантовой гравитации, но и с математической строгостью подкрепляют сконструированную здесь модель вселенной как квантового компьютера на основе жидкокристаллической голографии. Строго говоря, ни одна из теоретических работ женщин-физиков – Ренаты Лолл, Лизы Рэндалл, Евы Силверстейн и Фотини Маркопулу – абсолютно не подразумевала подобную интерпретацию их результатов. Просто так уж, видимо, устроена общая реальность мира математики и мира снов.

Если формулировать предельно кратко, то суть примечательных открытий этих исследовательниц – глядя через призму вселенной-компьютера – можно изложить так. Лиза Рэндалл и ее коллега-теоретик Раман Сундрум, развивая квантовую физику в пограничной области между Стандартной Моделью и теорией струн, открыли неожиданные свойства мира как дисплея-мембраны. Оказалось, что если мембрана сдвоенная, то появляются возможности (а) для существования не микроскопических, а сколь угодно больших скрытых измерений и (б) для естественного объяснения гигантских различий между силами гравитации и электромагнитных взаимодействий. С другой стороны, Ева Силверстейн, имеющая репутацию одного из ведущих струнных теоретиков, среди прочего сумела в подробностях показать процессы отслаивания тахионов от мембраны с их последующей конденсацией – то есть формирование квантовой голографической памяти.

Если работы упомянутых исследовательниц рассматривают мир-брану как уже имеющуюся данность, то изыскания Фотини Маркопулу и Ренаты Лолл посвящены – каждое сильно по-своему – проблемам возникновения пространства-времени с его причинно-следственными связями и прочими важными свойствами, наблюдаемыми в природе. Так, Ф. Маркопулу, начав с формализма петлевой квантовой гравитации, ныне разрабатывает идею о предгеометрической фазе вселенной – где изначально все атомы материи тесно связаны друг с другом, а затем они расходятся с порождением пространства как регулярной кристаллоподобной структуры. С существенно иной точки зрения, но примерно то же самое по сути – механизмы самоорганизации квантованного пространства-времени в устойчивые структуры – изучает и Рената Лолл в содружестве со своими постоянными соавторами, Яном Амьорном и Ежи Юркевичем. Их теория носит название Каузальная (т.е. причинная) Динамическая Триангуляция, и именно с нее имеет смысл начать.

Три источника КДТ [81]

Идею о том, что пространство в мельчайших своих масштабах обладает гранулированной структурой, можно обнаружить еще у древнегреческих мыслителей. В платоновском диалоге «Тимей», к примеру, четыре главных стихии или «элемента» природы – огонь, воздух, вода и земля – представлены как скопления крошечных частиц в форме правильных многогранников: тетраэдра, октаэдра, икосаэдра и куба. Более адекватные, с точки зрения сегодняшней физики, отражения той же концепции стали появляться в XVIII-XIX веках – в виде гипотез о светоносном эфире как вихревой губке.

Примерно тогда же среди математиков, закладывавших в 19 веке основы современной геометрии, стали появляться идеи о том, что фрагмент пустого пространства, для невооруженного глаза представляющийся совершенно гладким и бесструктурным, при гораздо меньших масштабах может иметь неровную и куда более замысловатую конфигурацию. На сегодняшний день эта чисто интуитивная некогда догадка представляется несомненным научным фактом, поскольку базовые принципы квантовой теории утверждают, что чем меньше масштаб пространства, тем большие в этом объеме флуктуационные всплески энергии. А согласно эйнштейновой общей теории относительности, с другой стороны, эти непрерывные флуктуации с необходимостью изменяют кривизну пространства-времени.

Для очень мелкого, так называемого планковского масштаба длины (10^{-35} метра), все это означает принципиальные усложнения в общей структуре геометрической ткани пространства, которая никогда не находится в покое. Подробное и количественно точное описание для сильно искривленной и квантово-флуктуирующей геометрии пространства-времени при планковском масштабе длины должна предоставить, как это видится большинству ученых, теория квантовой гравитации. Но именно ее на сегодняшний день у науки нет – из-за целого ряда хорошо понятных, в общем-то, проблем.

Самая, наверное, главная из этих трудностей заключается в том, что практически все из теорий, ныне претендующих на путь к объяснению квантовой гравитации, изначально оперируют наблюдаемым в природе 4-мерным пространством-временем как некоей заранее известной данностью. Хотя откуда именно эта данность возникла, совершенно неясно. Поэтому, уверенны наиболее последовательные в своих поисках ученые, подлинная теория квантовой гравитации должна показать, как именно возникает известное нам пространство со всеми его нетривиальными свойствами. И один, по крайней мере, путь к этой цели теоретиками уже найден.

#

Данный метод, получивший техническое название «каузальная динамическая триангуляция» или кратко КДТ, разработал коллектив европейских физиков – Ян Амбьерн из Дании, Ежи Юркевич из Польши и Рената Лолл из Голландии. Этим ученым впервые, похоже, удалось-таки покорить строптивую квантовую пену микропространства, где концепции типа «впереди» и «позади» или «раньше» и «позже» могут утрачивать свое привычное значение. В рамках КДТ наглядно и достаточно строго показан процесс самоорганизации, в конечном счете приводящий к порождению из этой фантастической пены того самого протяженного четырехмерного пространства-времени, которое обычно воспринимается всеми как само собой разумеющееся.

Для того, чтобы доходчиво пояснить суть метода КДТ, проще всего последовательно разобраться со смыслом каждого из элементов в названии. Все три термина по-своему важны, но начать логичнее с конца, то есть с «триангуляции». Под этим словом понимают разбиение поверхности на множество треугольников, так как с их помощью удобно делать строгие описания геометрических форм. Если же размерность пространства больше двух, то для его мозаичного формирования применяют так называемые симплексы – многомерные аналоги плоских треугольников. Обычному треугольнику на плоскости в трехмерном пространстве соответствует тетраэдр или 3-симплекс, гранями которого являются 4 треугольника. Аналогично, базовым строительным блоком четырехмерного пространства становится 4-симплекс – следующий эквивалент треугольника, гранями которого являются пять тетраэдров.

Хотя каждый из симплексов является геометрически плоским, их грани можно склеивать вместе разнообразными способами для порождения пространств с искривленной геометрией. И если размеры треугольников очень малы, то их мозаика без проблем может воспроизводить любую искривленную форму. Пояснить эту идею легче всего на простом примере плоской поверхности. Кривизна в любой конкретной точке отражается величиной суммарного угла, образованного треугольниками, которые ее окружают. Для плоской поверхности такой угол в точности равен 360 градусам – это склейка шести равносторонних треугольников. Но если удалить или добавить в склейке хотя бы еще один треугольник, то поверхность получится искривленной. Совершенно аналогично можно порождать плоское, вогнутое (отрицательно искривленное) или выпуклое (положительно искривленное) пространство больших размерностей, позволяя различному числу соответствующих симплексов сходиться вершинами в одной точке.

В начале 1960-х годов итальянский физик-теоретик Туллио Редже в каком-то смысле объединил идеи древних греков и общую теорию относительности, показав, что геометрические методы триангуляции, оперирующие множеством тетраэдров, очень удобны для описания кривизны пространства-времени. Разработанный ученым симплектический метод, со временем получивший название исчисление Редже, позволил красиво и экономно отыскивать решения для эйнштейновых уравнений гравитации без обременительного избытка координат, требующихся при традиционных алгебраических подходах.

##

Поскольку метод Редже предлагал наглядный и удобный для обсчета способ квантования пространства и времени, довольно скоро столь интересный подход попытались объединить с квантовой теорией, в результате чего родился метод «динамической триангуляции». Сделано это было путем скрещивания геометрии симплексов с одним из фундаментальных принципов квантовой физики – суперпозицией состояний.

Суть принципа, можно напомнить, заключается в следующем. Если в классической физике для всякого объекта подразумевается вполне конкретная и однозначно определенная траектория при движении из точки А в точку Б, то в квантовой физике подобная картина выглядит существенно иначе. Для объекта микромира, вроде электрона, такая траектория – это наложение или суперпозиция всех возможных путей из точки А в точку Б с учетом вероятностей каждого из маршрутов. Аналитически это вычисляется как «взвешенное среднее» с помощью так называемого интеграла по траекториям, предложенного Ричардом Фейнманом в 1940-е годы при разработке квантовой электродинамики.

a В конце 1970-х годов родилась идея распространить фейнмановский интеграл по траекториям на теорию гравитации – то есть рассчитывать динамику эволюции пространства-времени из состояния А к состоянию Б как взвешенное среднее всех возможных конфигураций геометрии. Это направление исследований, обычно связываемое с именем британского теоретика Стивена Хокинга, получило название «Евклидова квантовая гравитация», поскольку трактовало пространство-время как симметричное 4-мерное евклидово пространство, ничем не выделяющее время в особое измерение. (Была надежда, что специфические особенности времени каким-то образом появятся сами в качестве естественных следствий правильно выстроенной теории).

b В силу известных технических трудностей уравнения динамической триангуляции не решаются аналитически, то есть с помощью «пера и бумаги», а требуют проведения весьма трудоемких вычислительных экспериментов. По этой причине данное направление исследований получило особый подъем в 1980-1990-е годы вместе с быстрым развитием персональных компьютеров и стремительно растущей вычислительной мощностью процессоров. Но увы, в конечном итоге евклидову квантовую гравитацию ожидала полная неудача. Все вычислительные эксперименты приводили к результатам, не имеющим ничего общего с наблюдаемой вселенной. На выходе, как правило, получался плотно скомканный шар с бесконечно большим числом измерений. Либо, в некоторых ситуациях, происходило сворачивание геометрии в сильно разреженную древовидную структуру, напоминающую 2-мерный химический полимер со множеством разветвлений.

###

c Выход из очевидного тупика был найден тогда, когда к Амбьерну и Юркевичу, двум уже известным теоретикам динамической триангуляции, во второй половине 1990-х годов присоединилась голландская исследовательница Рената Лолл. Именно ей пришла в голову важнейшая идея об изначальном встраивании в модель принципа каузальности, что направило поиск в новом плодотворном направлении. Каузальность или причинность здесь означает, что пустое пространство-время конструируемой модели должно иметь в себе структуру, которая позволяла бы однозначно отличать причину от следствия. Иначе говоря, родился метод «Каузальной динамической триангуляции».

d Если говорить о технических подробностях метода, то здесь абсолютно каждому симплексу изначальное присваивается стрела времени, указывающая из прошлого в будущее. Затем для любой пары соседних симплексов накладываются строгие правила их причинного склеивания: два симплекса должны быть склеены вместе только так, чтобы их стрелы времени указывали в одном и том же направлении. Иначе говоря, эти симплексы должны иметь общий ход времени, которое постоянно движется в направлении этих стрел, никогда не стоя на месте и не разворачиваясь в обратном направлении. Таким образом, пространство сохраняет свою общую форму по мере разворачивания времени – оно не может распадаться на отдельные несвязанные куски или порождать кротовые норы, нарушающие порядок причины и следствия.

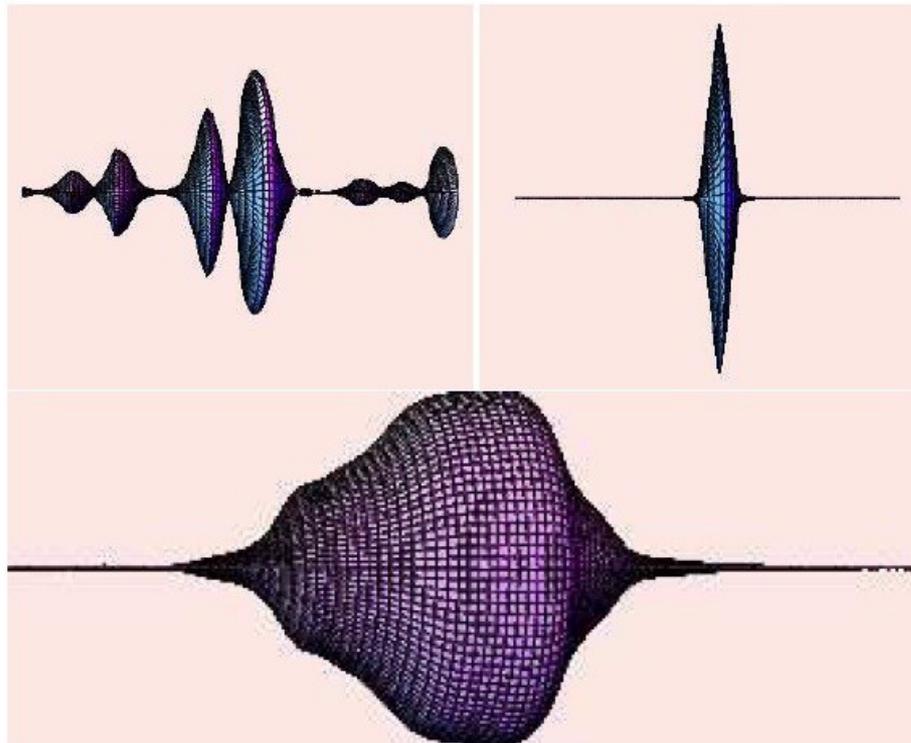
Как только эта стратегия в целом была сформулирована, на предельно упрощенных вычислительных моделях-симуляциях удалось показать, что каузальные правила склеивания симплексов ведут к крупномасштабной форме, заметно отличающейся от того, что получается в евклидовой квантовой гравитации. Этот пока еще небольшой, но идейно важный успех был получен разработчиками КДТ в 1998 году, однако его было явно недостаточно для моделирования полной четырехмерной вселенной. На дальнейшее развитие метода ушло еще около 6 лет и к 2004 году стало возможно проведение большого вычислительного эксперимента, завершившегося действительно замечательным успехом. Крупная динамическая модель, обсчитывающая каузальную суперпозицию всевозможных склеек для почти 200 тысяч 4-симплексов, дала на выходе не съездившийся комок и не свернувшийся полимер, а именно то, что ожидали, затаив дыхание, ученые – протяженный объект с числом измерений, равным 4.[1]

Этот результат, похоже, стал первым в истории физики случаем, когда количество измерений пространства-времени удалось вывести вычислениями из весьма ограниченного набора основополагающих принципов. Сразу вслед за этим успехом обозначились и следующие задачи – досконально изучить форму сконструированного пространства-времени на больших расстояниях, чтобы проверить, насколько она согласуется с реальностью и общей теорией относительности. Довольно быстро выяснилось, что модель КДТ работает лишь при том условии, если в нее изначально включена так называемая космологическая константа – невидимая, нематериальная и пока непостижимая физиками энергия, которую пространство содержит даже при полном отсутствии прочих, уже известных форм материи и энергии. Поскольку в конце 1990-х космологи обнаружили наблюдаемые свидетельства для такой энергии, ныне именуемой темной, это требование трактуется как очевидный плюс модели. Еще одним очень приятным для авторов плюсом стало то, что возникающее в их экспериментах пространство-время имеет в высшей степени симметричную форму пространства де Ситтера [2]. Такая геометрическая форма, обнаруженная голландским математиком Виллемом де Ситтером, является в точности решением уравнений Эйнштейна для пустой вселенной, которая не содержит ничего, кроме энергии космологической константы.

-
- [1] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz, and R. Loll. «Emergence of a 4D World From Causal Quantum Gravity». Phys. Rev. Lett. 93, 131301 (2004). [hep-th/0404156]
- [2] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz, and R. Loll. «Reconstructing the universe». Physical Review D, vol. 72 , 064014, 2005. [hep-th/0505154]

Пространство под микроскопом [82]

0 Разнообразные формы вселенных, порождаемых в вычислительных экспериментах Лолл, Амбьорна и Юркевича для их модели КДТ, естественным образом делятся на три существенно отличающиеся группы или фазы. Той вселенной, что реально наблюдается человеком в природе, по своей геометрии соответствует лишь одна из фаз модели, условно именуемая протяженной вселенной. Две же остальные фазы на окружающий мир не похожи совершенно.



Типичные конфигурации КДТ в фазах А, В и С
(внизу самая интересная - с протяженной 4D-геометрией)

1 Как показывают вычисления-симуляции, принадлежность порождаемого мира к той или иной фазе определяется двумя параметрами: гравитационной константой G и так называемым показателем асимметрии Δ , который фиксирует соотношение масштабов длин по осям времени и пространства. При больших значениях G и исчезающе малых значениях дельты (фаза В) вселенная быстро коллапсирует в скомканный шар. Если же значение G мало (фаза А), то вселенная распадается на быструю смену пространственных слоев очень разного - вплоть до исчезающе малого - пространственного объема. В обоих этих случаях никакой макроскопически протяженной геометрии пространства-времени получить не удастся.

2 Что же касается самой интересной фазы (С) - протяженной в пространстве и времени квантовой вселенной, то она появляется при достаточно больших значениях ньютоновой константы G и больших значениях показателя асимметрии Δ . Одно из важнейших достоинств модели КДТ - это высокая надежность метода, демонстрирующего, каким образом квантовое пространство устойчиво самоформируется из суперпозиции всевозможных геометрий. Создатели модели показали, что при изменении деталей в их симуляциях итоговые результаты эксперимента практически не меняются.

3 При этом разными способами определяемая размерность итогового протяженного пространства в макромасштабах всякий раз давала один и тот же, по сути, результат, равный 4 в пределах точности измерений. Однако попутно исследователям удалось сделать и удивительное открытие о размерности их модели-вселенной на микроскопических масштабах. Как оказалось, по мере уменьшения длин измерений вплоть до критически важной планковской длины (10^{-35} м) размерность пространства-времени также динамически уменьшается от классических 4 до примерно 2... [1]

#

4 В повседневной жизни под размерностью пространства обычно понимают минимальное число замеров (измерений), требующихся для задания местоположения объекта – таких как широта, долгота и высота. По этой причине, собственно, в качестве эквивалентного термина для размерности пространства выступает «число измерений». Поскольку при подобном наивном определении как самоочевидное подразумевается гладкое и сплошное пространство, подчиняющееся законам классической физики, значения размерности для геометрических форм имеют целочисленные величины: 0 для точки, 1 для линии, 2 для поверхности, 3 для объемной фигуры.

5 Однако пространства и фигуры вполне могут иметь и другую, куда более сложную форму, характеризующую дробной или, иначе, фрактальной размерностью. Например, морозные узоры на стекле не покрывают поверхность полностью, поэтому их размерность занимает промежуточное положение между 1 и 2. Или – другой популярный пример фрактала – дерево, каждую ветвь которого огрубленно можно полагать линией, однако в совокупности они заполняют часть 3-мерного объема. Для строгого описания такого рода форм в математике разработано несколько разных способов, вычисляющих число измерений и дающих в итоге разные числа, поскольку исследуются разные аспекты геометрии. Одна из наиболее известных и распространенных мер такого рода носит название хаусдорфова размерность, по имени германского математика Феликса Хаусдорфа, давшего ее определение в начале XX века. Суть этого определения сводится к тому, как объем некоторой области пространства зависит от ее линейного размера или «диаметра». Хаусдорфова размерность хороша тем, что вполне согласуется с обыденными представлениями о числе измерений в случаях, когда такие представления имеются. То есть хаусдорфова размерность объемной сплошной фигуры равна 3, гладкой поверхности – двум, гладкой кривой линии – единице. Для более же сложных конструкций и множеств фрактальной геометрии размерность Хаусдорфа может принимать дробные значения.

6 Возможны также и другие ситуации, когда для некоторых геометрических фигур количество измерений вообще не является фиксированной величиной и применяются иные методы определения размерности. В частности, одна из разновидностей вычислительных экспериментов в модели КДТ позволяет вычислять так называемую спектральную размерность пространства, основанную на моделировании физического процесса диффузии. Иначе говоря, в суперпозицию вселенных помещают что-то вроде чернильной капли, а затем наблюдают, как эта капля постепенно рассасывается. Составляющие же ее компоненты, соответственно, в это время мечутся из стороны в сторону под воздействием квантовых флуктуаций в строительных блоках пространства-времени. Для подобного рода экспериментов разработан специальный математический аппарат, который по темпам изменений в размерах чернильного облака позволяет определять количество измерений в данном пространстве.

Результат такого компьютерного эксперимента в условиях КДТ для больших масштабов дал ожидаемое значение 4, однако на микроскопических расстояниях оказался для исследователей в высшей степени неожиданным. Выяснилось, что количество измерений пространства зависит от масштаба, на котором это пространство изучают. То есть, когда диффузии разрешено происходить лишь очень краткое время, тогда число измерений у пространства-времени оказывается одним, а если диффузия длится достаточно долго, то постепенно размерность мира становится совсем другой. Формулируя то же самое чуть иначе, пространство демонстрирует способность гладко изменять свою размерность в зависимости от разрешающей способности микроскопа, имеющегося у исследователей.

##

Самим ученым, открывшим эту неожиданную закономерность, для ее наглядного пояснения не удалось подобрать подходящей аналогии из повседневной жизни. Зато у журналистов, комментировавших открытие в научно-популярной прессе, разнообразные метафоры отыскивались довольно быстро. Одна из наиболее удачных, возможно, аналогий, приведена в журнале Scientific American, где квантовое пространство-время модели КДТ предложено представлять себе как снежные сугробы, покрывающие неровные склоны горы. Такой снег на больших масштабах длин выглядит полностью трехмерным и гладким, а при тщательном изучении структуры на малых расстояниях оказывается фракталом, составленным из плоских и ажурных гранул-снежинок.

Создателей КДТ, впрочем, куда больше интересовали не наглядные метафоры-анalogии, а куда более конкретные особенности получившейся модели. Например, насколько малы те масштабы, при которых классическая геометрия перестает работать? Эксперименты показали, что вплоть до длин порядка 10^{-34} метра квантовая вселенная в целом все еще хорошо описывается классической, четырехмерной де Ситтеровой геометрией, хотя роль квантовых флуктуаций уже начинает нарастать. При более коротких расстояниях флуктуации пространства-времени становятся настолько сильными, что понятия классической геометрии быстро разваливаются, а количество измерений падает с привычных четырех до значения около двух.

Для лучшего понимания того, что означает термин «около двух», имеет смысл поподробнее ознакомиться с тем, как именно ученые исследовали размерность пространства в своей модели на малых расстояниях. Важнейшая особенность квантовых вселенных, порождаемых в КДТ, – это их строго послойное формирование, по сути своей очень похожее на то, как объемные формы послойно выстраивают сканеры-томографы или 3D-принтеры. В модели КДТ методы диффузии дали самые интересные результаты при исследовании внутренней геометрии так называемых «тонких» и «толстых» пространственных слоев.

Тонким слоем, по определению, называют пространственную геометрию при фиксированном целочисленном значении времени где-то внутри вселенной. Или проще говоря, это временной срез самой минимальной толщины. Ну а толстый слой, соответственно, это что-то типа сэндвича – фрагмент пространства-времени, состоящий из двух соседних тонких слоев. Именно для таких структур было обнаружено, что динамически определяемые размерности их геометрии совершенно не совпадают со значениями, которые принято ожидать от соответствующих подмножеств у классического четырехмерного пространства-времени.

###

В частности, для тонких слоев установлено, что измерения их хаусдорфовой размерности с хорошей точностью дают значение 3, однако спектральная размерность при этом оказывается в два раза меньше – всего 1,5. Более того, проведя дополнительные измерения по более сложной методике, исследователи смогли показать, что полный набор параметров данной системы соответствует вполне конкретному классу разветвленных полимеров. Иначе говоря на минимальных масштабах длин пространство оказывается фракталом древоподобной структуры.

Не менее интересный результат был получен и для толстых слоев. Было обнаружено, что два соседних тонких слоя при совокупном рассмотрении имеют хаусдорфову размерность 4, а спектральная размерность соответственно возрастает до значения около 2. Этот результат показал, что геометрия толстых слоев образует промежуточный класс между тонкими слоями и полным пространством-временем со спектральной размерностью 4. В частности, геометрия толстых слоев – хотя еще далеко не классическая – выглядит уже более организованной и регулярной, нежели хаотичная геометрия тонких слоев.

Особо же примечательным оказывается здесь следующий факт. Гладкое изменение размерности пространства-времени от значения около 4 на больших масштабах до значения около 2 на малых расстояниях – это не только открытие КДТ, крайне неожиданное для самих создателей модели, но и результат, почти одновременно полученный совсем другими исследователями в существенно иных вариантах теории квантовой гравитации. Например, видный чешский физик Петр Хорава, давно работающий в США и считающийся одним из родоначальников концепции мира-браны в теории струн, в начале 2009 года предложил собственного кандидата на роль квантовой теории гравитации. По некоторым техническим причинам Хорава назвал свою теорию «квантовой гравитацией в точке Лифшица», но довольно скоро обнаружил в ней немало общего с КДТ, хотя и выстраивал свою модель на основе совсем других соображений. В частности, Хорава показал, что если на его теорию распространить идею «спектральной размерности», то можно вывести аналитически формулу для зависимости числа измерений от масштабов расстояний. По этой формуле получилось, что и в модели Хоравы спектральная размерность пространства уменьшается с 4 при больших масштабах до 2 на коротких расстояниях.[2]

Другой исследователь, германский теоретик Мартин Ройтер из университета Майнца, разрабатывает собственное направление, названное им QEG или «квантовая эйнштейновская гравитация». Ройтер развивает идею, много лет назад предложенную Стивеном Вайнбергом – о том, что на чрезвычайно малых масштабах расстояний может иметься некоторая «фиксированная точка», начиная с которой сила гравитации далее уже не нарастает. Когда Вайнберг предложил эту идею в 1970-е годы, у физиков еще не было математического инструментария для вычисления такой фиксированной точки в 4-мерном пространстве-времени общей теории относительности. К концу 1990-х Ройтеру удалось разработать нужный метод, а в начале 2000-х совместно с О. Лаушером им был установлен интригующий факт [3]. В квантовой эйнштейновой гравитации пространство-время на мельчайших масштабах расстояний оказывается фрактальным, а количество измерений сжимается с классических четырех до всего двух. Это открытие Ройтера очевидно соотносится с результатами КДТ и Петра Хоравы, что порождает естественный вопрос: а не являются ли все эти теории разными описаниями одной и той же модели? Сами исследователи с готовностью признают, что в конечном счете предложенные ими подходы вполне могут оказаться эквивалентными.

-
- [1] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz and R. Loll. «Spectral dimension of the universe», preprint Utrecht, May 2005 [hep-th/0505113]
- [2] Petr Horava, «Quantum Gravity at a Lifshitz Point», arXiv: [hep-th/0901.3775], 2009 ;
Petr Horava, «Spectral Dimension of the Universe in Quantum Gravity at a Lifshitz Point»,
arXiv: [hep-th/0902.3657] 2009.
- [3] M. Reuter. «Nonperturbative evolution equation for quantum gravity», Phys. Rev. D 57 (1998) 971-985 [hep-th/9605030]; O. Lauscher and M. Reuter. «Fractal spacetime structure in asymptotically safe gravity», JHEP 0510 (2005) 050 [hep-th/0508202]

Мосты и ZZ-браны [83]

0 Среди важнейших достоинств каузальной динамической триангуляции обычно упоминают такие ее особенности, как универсальность, высокая надежность предложенного рецепта самоорганизации и впечатляющий минимализм в выборе исходных условий. Последнее из перечисленных достоинств – минимализм – пояснить, наверное, легче всего. За исключением авторов модели КДТ, пока что больше никто не смог предложить внятных объяснений тому, почему пространство-время вселенной такое, какое есть, и при этом обойтись совсем небольшим набором хорошо известных физических принципов (квантово-механическая суперпозиция, причинность, триангуляционная геометрия).

1 Если говорить об универсальности, то под этим термином обычно принято понимать нечувствительность модели к разнообразию мелкомасштабных деталей. Это хорошо известный феномен в статистической механике, связанный со свойствами систем из множества взаимодействующих компонентов и проявляющийся на масштабах, намного превышающих размеры отдельных компонентов. Людвиг Больцман в свое время чрезвычайно успешно применил идею универсальности для развития термодинамики. При изучении молекулярной динамики газов и жидкостей им было показано, что эти субстанции ведут себя почти одинаково в независимости от того, каков их конкретный состав.

2 В модели КДТ элементарными строительными блоками пространства-времени являются 4-симплексы, т.е. четырехмерные пирамидки-обобщения треугольников. Однако, подчеркивают авторы, сама по себе форма этих строительных блоков не имеет какого-то прямого физического смысла. Это просто удобные для вычислений аппроксимации. И если бы это было удобнее для подсчетов, то с тем же успехом можно было брать блоки хоть с кубическими, хоть с пятиугольными гранями, хоть любую их смесь – потому что в пределе такие детали не играют никакой роли. Единственно важным содержанием тут является коллективное поведение данных строительных блоков, мысленно сжимаемых вплоть до нулевого размера.

3 Еще одно важнейшее достоинство КДТ – «возмутительно» простой и надежный рецепт самоорганизации. В формулировке самих авторов звучит он примерно так: «Взять несколько базовых ингредиентов, собрать их вместе согласно хорошо известным квантовым принципам, хорошенько взболтать, затем дать смеси осесть – и вот вами создано квантовое пространство-время». Иначе говоря, микроскопические блоки пространства-времени, взаимодействующие друг с другом по простым правилам, диктуемым гравитацией и квантовой теорией, спонтанно организуют себя в единое целое, подобно тому как у молекул происходит самосборка в кристаллические или аморфные твердые тела. При этом итоговый результат моделирования всякий раз оказывается по сути неизменным, т.е. нечувствительным к тому, как изначально были расположены элементы гигантского ансамбля относительно друг друга.[1]

#

4 Помимо уже перечисленных преимуществ КДТ, данная модель имеет и множество других привлекательных свойств. Таких, к примеру, как глубинные связи – нечто вроде соединительных мостов – с другими подходами к проблеме квантования гравитации, вроде теории струн и петлевой квантовой гравитации. Пока что эти теории конкурируют друг с другом и представляются их сторонникам несовместимыми. О возможности объединения столь разных подходов на базе КДТ разговор еще предстоит, а сейчас явно пора отметить ключевые моменты сходства между каузальной динамической триангуляцией и той конструкцией мира, что очерчена в ходе Картезианских игр предыдущего раздела.

5 Поскольку словосочетание «модель вселенной как Квантового Компьютера на основе Акусто-Оптической Голографии» оказываются чересчур длинноватым, а в сокращенном виде звучит скорее комично, нежели содержательно – что-нибудь типа «модель КваКомАкОпГол» – то ради краткости имеет смысл говорить просто о Модели. Правда, тогда для поддерживающей ее теории лучше всего подошло бы скромное название М-теория, но оно уже давно занято в струнной теории бран. Впрочем, есть основания полагать, что и великая М-теория бран выглядит вполне подходящей для Модели, но об этом – когда дело дойдет.

6 Здесь же, возвращаясь к КДТ, пора отметить, что практически для всех важных особенностей этой теории, имеющих в ее рамках абстрактно-отвлеченный характер, в Модели имеются наглядные аналоги вполне конкретного физического свойства. Начать надо, естественно, с базовых строительных блоков пространства-времени, представленных 4-симплексами. В Модели им соответствуют микроскопические вихри – как ячейки вихревой губки, образующей пространство-время (эти ячейки, можно напомнить, образуются как парные вихри в цепочках фон Кармана). Кроме того, как физический микровихрь, каждый элемент такой губки или пены естественным образом имеет спин или собственную ось вращения. А это означает, что попутно можно установить непосредственную взаимосвязь между КДТ, Моделью и квантовой петлевой гравитацией, трактующей пространство как «спиновую сеть».

7 Следующий момент КДТ – периодическое «встряхивание и осаждение» симплексов через равные интервалы времени для получения взвешенного среднего в совокупном состоянии геометрий пространства. Очевидным физическим аналогом для этой абстрактной процедуры являются акустические колебания мембраны, которые перетряхивают все образующие ее микровихри-ячейки. Принципиально необходимой в Модели энергии, вызывающей эти осцилляции мембраны, в структуре КДТ соответствует столь же необходимая космологическая константа, с некоторых пор все чаще именуемая «темной энергией».

##

8 Еще один принципиально важный момент для каузальной динамической триангуляции – это обеспечение четких причинно-следственных связей при последовательном формировании слоев пространства-времени. Делается это, как уже говорилось, путем сонастраивания направлений стрелы времени у каждого из склеиваемых друг с другом симплексов. В физической Модели, соответственно, то же самое делается естественным образом, поскольку при каждом такте осцилляции вся мембрана целиком смещается по оси времени, что принудительно перемещает в нужном направлении все образующие ее ячейки-микровихри. Таким образом формируется общая стрела времени для совокупной вселенной.

g Наконец, нельзя не заметить, что как в Модели, так и в вычислительных симуляциях КДТ эволюция 4D-пространства происходит по одной и той же, в сущности, схеме. За каждую минимальную единицу времени происходит формирование очередного слоя пространства-времени. Но если в рамках КДТ вернуться в предыдущие временные слои невозможно из-за «правил», изначально наложенных на конструкцию, то в структуре Модели это невозможно физически. Потому что здесь весь «реальный мир» сводится к поочередным смещениям двух поверхностей осциллирующей мембраны.

a Физика хаотического, но в то же время и частично упорядоченного движения микровихрей в слоях мембраны может прояснить и странные перемены в размерности пространства при минимальных масштабах. Для того, чтобы понять естественные ограничения на броуновское движение микровихрей в слое «квантовой пены», надо вспомнить, что они образуются в результате срыва потока, обтекающего вихревую нить винтовой дислокации. Иначе говоря, все они при отрыве движутся лишь в направлении потока и при этом образуются парами. При более формальном взгляде на данный процесс, в траекториях таких вихрей за краткий промежуток времени можно увидеть структуру полимера, ветвящегося, грубо говоря, «в одну сторону». В условиях тонкого и толстого слоя это отражается в спектральной размерности значения 1,5.

b При этом «обычная» или хаусдорфова размерность тонкого слоя в КДТ равна 3, что в Модели – и в наблюдаемом мире – соответствует размерности трехмерной оболочки, которая в своей протяженности гладко, без разрывов и склеек образует 4-мерную форму с односторонней поверхностью типа листа Мебиуса. Что же касается «толстых» сдвоенных слоев в КДТ, играющих важную роль для общего упорядочивания пространства и возрастания его размерности до 4, то в Модели такого же рода сдвоенный слой – это суть структуры той динамической мембраны, что образует «сэндвич» из двух взаимно-дополняющих поверхностей дисплея-вселенной.

###

c Для дальнейшего развития Каузальной Динамической Триангуляции, как считают авторы теории, предстоит решить задачу о том, каким образом в их пустую вселенную встраивается материя с массой. С точки зрения компьютерных симуляций эта проблема по своей вычислительной сложности в гигантских масштабах превосходит имеющиеся ныне у исследователей возможности. Не говоря уже о том, что и на общем теоретическом уровне задача о природе массы пока еще очень и очень далека от своего разрешения.

d Конкретно для ситуации с применением КДТ, авторы теории в качестве генеральных направлений развития выбрали сближение со струнной теорией и эксперименты с «игрушечными» моделями вселенной меньшей размерности (для начала 2D). Если говорить об уже достигнутых здесь успехах, то к началу 2008 года создателям КДТ удалось сформулировать свой собственный вариант струнной теории поля. По сути дела, это еще один вариант теории двумерной квантовой гравитации, разрабатываемой множеством других исследователей, но в данном случае определенной именно через динамические каузальные триангуляции.[2]

e Главным следствием такого теоретического продвижения стало то, что теперь КДТ стала значительно более гибкой. Если в исходной теории топология пространства-времени всегда была жестко зафиксированной и неизменной, то в новом варианте топологические флуктуации пространства оказались не только возможны, но и принципиально необходимы. Иначе говоря, было установлено, что кратковременное появление на поверхности пространства дырок, стяжек и отростков-ответвлений обязательно должно сопровождать эволюцию вселенной столь же большого размера, как наблюдаемая.

В процессе развития КДТ естественным образом оказался приобщен в теорию и очень любопытный математический объект под названием ZZ-брана [3]. Это название происходит от фамилий авторов, открывших конструкцию, - двух русских теоретиков, братьев-близнецов Александра и Алексея Замолодчиковых, совместные работы которых подписывались как «Zamolodchikov and Zamolodchikov». В начале 2000-х годов братьям физикам удалось аналитически решить важную задачу квантовой гравитации - показав, как именно квантуются двумерные поверхности с флуктуирующей геометрией [4]. В решениях, найденных Замолодчиковыми, наибольший интерес вызвали особые точки алгебраической поверхности, в которых происходит переход от компактной к некомпактной топологии. Или, грубо говоря, образуются «дырки-стяжки» в ткани пространства. Такого рода особые точки получили название ZZ-бран, и есть сильное подозрение, что именно они позволяют встраивать в вакуум материю.

-
- [1] Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz and Renate Loll, «The Self-Organizing Quantum Universe», Scientific American, July 2008
 - [2] J. Ambjorn, R. Loll, Y. Watabiki, W. Westra, S. Zohren. «A String Field Theory based on Causal Dynamical Triangulations», arXiv: hep-th/0802.0719v1 (5 Feb 2008)
 - [3] J. Ambjørn, S. Arianos, J. A. Gesser and S. Kawamoto. «The Geometry of ZZ-branes», (2004) arXiv: hep-th/0406108v1
 - [4] A. Zamolodchikov and Al. Zamolodchikov. «Liouville Field Theory on a Pseudosphere», (2001) arXiv: hep-th/0101152v1

[7♠] Лиза, или Красота бран

Раздвоение имеет значение [84]

0 Решить проблему квантования гравитации – значит найти способ для сведения уравнений квантовой физики и общей теории относительности в единую взаимосогласованную систему. А затем, естественно, отыскать решения для этой системы. Логично ожидать, что найденные таким путем решения не только опишут уже известные свойства наблюдаемой вселенной, но и позволят открыть – т.е. теоретически предсказать – какие-то новые, пока еще неведомые особенности мира.

1 Решения, найденные братьями-близнецами Замолодчиковыми для условий «игрушечной» модели двумерного пространства особо заинтересовали теоретиков именно тем, что предсказывали весьма необычные вещи. Строго говоря, задача квантования 2D-гравитации была ими последовательно решена для двух базовых вариантов поверхности. Сначала – совместно с В. Фатеевым – в условиях компактной топологии на диске [1], а еще через год – для некомпактной псевдосферы [2], т.е. для поверхности с постоянной отрицательной кривизной, иначе именуемой плоскостью Лобачевского. Вторая в этом ряду работа дуэта ZZ оказалась особо важна, поскольку продемонстрировала, что некомпактная геометрия псевдосферы (где кратчайшее расстояние между двумя объектами или геодезическая может уходить в бесконечность) обеспечивает существенно новую физическую картину для 2-мерной квантовой гравитации.

2 Во-первых, выяснилось, что эта картина заметно отличается от игрушечных проблем компактной геометрии и фактически оказывается намного ближе к стандартной физике в обычной теории поля. А во-вторых – что еще интереснее – конструкция, выстроенная авторами в качестве решения задачи, одновременно поставила перед ними целый ряд новых вопросов, ответить на которые оказалось крайне нелегко. Наиболее интригующим моментом в физике пространства с флуктуирующей геометрией оказалась природа «возбужденных» вакуумов на бесконечности «абсолюта». Одна из специфических особенностей в искривленной геометрии псевдосферы – это наличие окружности, бесконечно удаленной от всех прочих точек поверхности, и именуемой «абсолют».

3 Формулы найденного ZZ решения свидетельствуют, что во всех таких возбужденных вакуумах функции корреляции между двумя точками очень быстро (экспоненциально) возрастают по мере удаления к абсолюту, т.е. вместе со стремлением геодезического расстояния к бесконечности. Как прокомментировали авторы, «смысл этих квантовых возбуждений у физически бесконечно далекого абсолюта пока еще ожидает своего постижения». Более того, авторы подчеркивают, что в этих возбужденных вакуумах при возрастающих корреляциях на больших расстояниях попутно происходят существенные деформации пространства («доминируют нетривиальные вырожденные граничные операторы отрицательных измерений»). Поиск внятных объяснений столь необычным закономерностям стал областью интенсивных исследований для множества других теоретиков.

#

Имеет смысл, наверное, отметить, что собственно в работе братьев Замолодчиковых, разрешившей задачу квантования гравитации на псевдосфере и давшей начало ZZ-бранам, вообще не встречается столь популярный ныне термин «браны». Просто в контексте современной теоретической физики, особенно в струнной теории, такого рода граничные условия, что рассмотрены в статьях ZZ, с некоторых пор стали чуть ли не синонимом для весьма широкого понятия брана. В целом под этим словом
4 ныне принято понимать любые мембрано-подобные объекты в пространстве более высокой размерности, обеспечивающие необходимые граничные условия для всего, что имеет «край». Брана может оборачивать совсем крошечную область пространства, изображая частицу, а может быть и бесконечно протяженной, сама образуя целый замкнутый мир-подпространство в пространстве с большим числом измерений.

Первые браноподобные объекты начали появляться в физике еще в 1980-е годы. В космологии одним из характерных примеров стала так называемая **p**-брана – экзотический объект, выведенный теоретиками чисто математически из эйнштейновых уравнений общей теории относительности и в некоторых измерениях простирающийся бесконечно далеко, а в других представляющийся чем-то вроде черной дыры. В физике частиц, с другой
5 стороны, были предложены теоретические конструкции с механизмами для захватывания и удержания частиц на браноподобных поверхностях. Однако самую основательную разработку данное направление получило в теории струн, поскольку здесь обнаружили такие браны, которые могли захватывать не только частицы, но и силы. Именно эта особенность, собственно, и сделала их столь интересными.

Новую «эпоху бран» в струнной теории принято отсчитывать с 1995 года, когда Джо Полчински из КИТР, Института теоретической физики Кавли в Санта-Барбаре, убедительно продемонстрировал, что эти объекты не только полезны, но и сущностно необходимы для дальнейшего развития теории. Браны, по сути дела, оказались давно недостающим звеном общей картины,
6 которое не только помогло разрешить сразу несколько давних головоломок, озадачивавших струнных теоретиков, но и позволило открыть нечто новое и ошеломляющее под названием «дуальные теории». Так стали называть пары эквивалентных теорий, которые на первый взгляд выглядят очень разными и описывающими существенно различные вещи, однако в итоге приводят к совершенно одинаковым физическим последствиям.

Множество новых и интересных результатов, полученных в струнной теории благодаря ее дополнению бранами, существенно расширило представления физиков о допустимых возможностях для глобальной природы пространства-времени. Теперь вполне постижимой стала
7 выглядеть, к примеру, ситуация, при которой вселенная в целом имеет более высокую размерность, однако те частицы и силы, которые известны человеку, привязаны к меньшему числу измерений – на бране меньшей размерности. Соответственно, если частицы Стандартной Модели удерживаются на бране, то из этого вовсе не следует, что все частицы природы обязаны быть на той же самой бране. Вполне могут быть и другие частицы, образующие другие «брано-миры». Ну а совокупность таких брано-миров с разной физикой в целом может составлять куда более великую вселенную.

##

Главное, пожалуй, чем оказался привлекателен для теоретиков подобный ход рассуждений, это то, что уже установленные и не подлежащие сомнению законы и правила, управляющие физикой частиц в известном нам мире, во вселенной более высоких размерностей вполне могут быть и другими – в большей или меньшей степени. Иначе говоря, вместе с дополнительными измерениями появляются и новые способы для разрешения некоторых особо трудных и крайне озадачивающих проблем Стандартной Модели. По этой причине за последнее десятилетие теоретиками было сконструировано немало вариантов брано-миров, предлагающих те или иные пути как для разрешения загадок СМ, так и для преодоления общего кризиса в физике.

Самой, возможно, интересной и многообещающей среди конструкций подобного рода (если судить по количеству ссылок и цитирований) оказалась модель брано-миров, выдвинутая Лизой Рэндалл и Раманом Сундрумом. Однако прежде, чем переходить к описанию этой модели, будет справедливо упомянуть ее важного предшественника – самый первый среди известных брано-миров, носящий краткое название HW по первым буквам фамилий его создателей [3]. Два видных теоретика, Петр Хорава и Эдвард Виттен, занимались исследованием дуальностей струнной теории, в результате чего пришли к примечательной двух-бранной модели, которая определенно предвосхитила важные черты других брано-миров – в частности, и для модели Рэндалл-Сундрума.

Брано-мир HW представляет собой 11-мерное пространство-время, где 10-мерное пространство всей вселенной-балка ограничено двумя параллельными бранами, каждая из которых имеет девять пространственных измерений плюс еще одно, дополнительное, протяженное между бранами. Если принимать во внимание измерение времени, то получится две 10-мерных браны, разделенных 11-м измерением. В модели Хоравы и Виттена подразумевается, что частицы и силы Стандартной Модели расположены на одной из двух бран, в то время как гравитация и другие частицы, также являющиеся частью струнной теории, но не наблюдаемые в нашем мире, либо живут на другой бране, либо – как гравитация – вообще вне бран в полном 11-мерном балке.

В соответствии со стандартной линией рассуждений в струнной теории, если брано-мир Хоравы-Виттена должен соответствовать реальности, то 6 из его измерений должны быть невидимы. Авторы модели на данный счет подразумевали, как это обычно делается для струн, что 6 измерений скручены или «компактифицированы» в крошечную форму многообразия Калаби-Яу. Ну а когда 6 невидимых измерений свернуты, то вселенную HW можно рассматривать как модель 5-мерной вселенной с двумя 4-мерными граничными бранами. Именно эта конфигурация – 5-мерный мир с двумя граничными бранами – представляет для физиков особо большой интерес и исследуется очень многими теоретиками, поскольку то и дело возникает в самых разных контекстах.

###

Модель брано-мира Хоравы-Виттена выглядела особо привлекательно по той причине, что вмещала в себя не только частицы и силы Стандартной модели, но также допускала и полную Теорию Великого Объединения СМ с гравитацией. Ибо в этой модели для гравитации становится вполне возможным иметь при высоких энергиях тот же порядок величины, что и другие силы, коль скоро гравитация здесь происходит из более высоких размерностей пространства.

Кроме того, общая конструкция брано-мира NW дала целый ряд важных элементов, очевидно полезных при построении других моделей, стремящихся максимально приблизиться к физике реального мира. Существенно, что в NW имеется больше одной браны, а это означает, что такой мир может содержать силы и частицы, находящиеся на разных бранах и потому взаимодействующие друг с другом только очень слабо. Другое важное свойство мира бран – это введение в физику новых масштабов длин (вроде размера дополнительных измерений), а это представляется весьма существенным для решения одной из важнейших проблем фундаментальной физики – почему в единой теории должны быть столь непостижимо разные масштабы энергий и масс? И, наконец, еще одна важная черта модели NW – это то, что браны и балк могут нести в себе энергию. Причем энергия эта не зависит от частиц, которые имеются в наличии, поскольку может содержаться в бранах и балке более высокой размерности. Данная энергии, как и все прочие ее формы, тоже искривляет пространство-время балка, а такая кривизна пространства-времени может быть очень важной для физики миров-бран.

Впрочем, при всех своих замечательных свойствах браномир Хоравы-Виттена имел и очевидно слабые стороны. Прежде всего, модель NW страдала от тех же самых проблем, что имеют и все прочие конструкции струнной теории при воспроизведении физики реального мира. Из-за того, что все дополнительные измерения здесь такие крошечные и ненаблюдаемые, теорию Хоравы-Виттена по сути невозможно протестировать экспериментально. Иначе говоря, размер и форма скрученных измерений никак не определены, а значит среди необозримого множества всевозможных версий струнной теории практически невозможно отыскать такую, которая корректно описывает наблюдаемую природу и способна делать проверяемые предсказания.

Можно предположить, что именно по этой причине, наверное, столь огромный интерес среди физиков вызвало появление работ Рэндалл и Сундрума, которые создали собственную модель брано-миров, перенявшую сильные стороны NW и в то же время предложившую нечто в корне новое вместо известных слабостей. Принципиальным новшеством здесь стало то, что Лиза Рэндалл, работавшая вне лагеря струнных теоретиков, предложила отказаться от давно привычной среди них компактификации, то есть от сворачивания дополнительных измерений до очень маленьких размеров. С помощью Рамана Сундрума – и к изумлению всего прочего научного сообщества – она смогла вполне строго показать, что на самом деле вполне можно выстроить непротиворечивую теорию с такими дополнительными измерениями, которые вовсе не надо сворачивать. Так что важное пятое измерение может быть и бесконечно большим, а физика наблюдаемого мира при этом будет по-прежнему представляться четырехмерной.

-
- [1] V. Fateev, A. B. Zamolodchikov and A. B. Zamolodchikov, «Boundary Liouville Field Theory I. Boundary State and Boundary Two-point Function», arXiv:hep-th/0001012.
 - [2] A. B. Zamolodchikov and A. B. Zamolodchikov, «Liouville field theory on a pseudosphere», arXiv:hep-th/0101152.
 - [3] P. Horava and E. Witten, “Heterotic and Type I String Dynamics from Eleven dimensions,” Nucl. Phys. B460 (1996) 506, hep-th/9510209.

Замыкая круг [85]

Масштабность открытия, сделанного в новаторских работах Лизы Рэндалл и Рамана Сундрума, становится более понятна, если их результаты изобразить на подходящем историческом фоне. Сделать это тем более необходимо по той причине, что дополнительные измерения пространства-времени начали появляться в теоретических моделях физиков еще на заре XX века, суля необыкновенно простой и красивый путь к пониманию единства всех явлений природы. Однако науке понадобилось еще почти сто лет, чтобы по весьма извилистым маршрутам прогресса вновь приблизиться к манящей красоте простых решений.

В 1914 г. финский теоретик Гуннар Нордстрем (1881-1923), ученик одного из величайших математиков того времени Давида Гильберта, первым, судя по всему, обнаружил очень эффективный способ объединить все известные в ту пору силы природы. Ученый показал, что через ввод еще одного дополнительного измерения для пространства оказывается возможным из уравнений электромагнетизма Максвелла вывести также и формулу гравитационного взаимодействия Ньютона [1]. Релятивистская теория гравитации Эйнштейна в ту пору еще даже не родилась, поэтому выкладки Нордстрема были построены на основе плоского пространства-времени Минковского. А потому, естественно, не предсказывали эффекты искривленного массой пространства, вроде отклонения лучей света.

Эйнштейн уже был знаком с Гуннаром Нордстремом и с интересом критиковал его предыдущие работы о релятивистской гравитации, а некоторые из созвучных идей коллеги в преобразованном виде впоследствии включил в свою ОТО. Однако для совершенно новой идеи – о пятом измерении пространства – момент появления оказался крайне неудачным. Именно в это время разразилась Первая мировая война, так что должного внимания к себе работа Нордстрема в научном сообществе не получила.

Еще через несколько лет, в 1918, другой ученик Гильберта, Герман Вейль (1885-1955) придумал собственный способ для формального объединения гравитации и электромагнетизма в единую согласованную систему. Причем здесь это было сделано без привлечения пятого измерения, но с опорой на придуманный Вейлем новый математический аппарат калибровочных преобразований. Красота математической конструкции Вейля была достаточно очевидна уже для современников, однако, как подчеркивал в своих отзывах Эйнштейн, ей крайне не доставало связей с реальным миром. Хотя и не востребованная сразу, красивая математика калибровочных симметрий отнюдь не пропала – однако подлинную важность этого подхода физики постигнут много позже, уже после второй мировой войны.

#

Важнейший прорыв (правда, в то время знать об этом не мог никто) произошел в 1919 году, когда открылась неизвестная прежде сторона у совсем новой в ту пору эйнштейновой теории гравитации. При выводе уравнений общей теории относительности Эйнштейну было вполне достаточно четырех измерений – трех пространственных и одного временного. Однако математические формулы ОТО имеют такую структуру, что их можно достаточно естественным образом обобщить и составить аналогичные уравнения для вселенной, имеющей большее число пространственных измерений.

Именно такое исследование и провел в начале 1919 года Теодор Калуца (1885-1954), никому дотоле неизвестный приват-доцент Кенигсбергского университета. Добавив в эйнштейновы уравнения всего одно – пятое – дополнительное измерение, Калуца к своему изумлению обнаружил, что в итоге удается элегантно свести теорию гравитации Эйнштейна и теорию электромагнетизма Максвелла в единую и однородную концептуальную систему. В частности, в манускрипте Калуцы, который автор послал Эйнштейну, было показано, что если формулы ОТО расширить на пятимерное пространство-время, то в итоге уравнения можно разделить на обычную четырехмерную гравитацию плюс дополнительный набор, эквивалентный максвелловским уравнениям для электромагнитного поля, и плюс еще одно неясное поле скалярной природы (т.е. имеющее всего одну компоненту, воздействующую на каждую точку пространства независимо от поворотов системы координат – можно сказать, что след так называемой «темной энергии» был замечен в самом начале пути).

Вне всяких сомнений, это был очень красивый, хотя и довольно странный результат, поскольку никто не мог внятно объяснить, как следует понимать пятое измерение, раз его никто и никогда в природе не наблюдал. Но как бы там ни было, результат Калуцы обладал бесспорной силой и убедительностью благодаря своим строгим математическим выкладкам. И что еще, наверное, важнее, с эстетической точки зрения эти выкладки приводили к очень привлекательной картине, которая демонстрировала, что через дополнительное пространственное измерение все известные во вселенной силы глубоко и неразрывно между собою связаны.

По рекомендации Альберта Эйнштейна революционная статья Калуцы [2] в 1921 году была опубликована в трудах Берлинской академии наук под названием «К проблеме единства физики» и заканчивалась такими словами: «Очень трудно примириться с мыслью, что все эти соотношения, которые вряд ли можно превзойти по достигнутой в них степени формального единства, – всего лишь капризная игра обманчивой случайности». Сам же Эйнштейн был настолько впечатлен идеей объединения фундаментальных сил в пятимерном пространстве, что увидел в ней суть постижимой для человека «величайшей простоты законов природы». Вплоть до середины 1940-х годов он самыми разными способами пытался применить эту великую идею для создания единой теории поля, но, увы, абсолютно безуспешно.

##

С подачи Эйнштейна новая и красивая теория поначалу была встречена в научном сообществе с энтузиазмом. Особенно этот интерес возрос после того, как в 1926 году шведский математик Оскар Клейн сумел объединить гипотезу Калуцы с идеями бурно развивавшейся в ту пору квантовой механики. Чтобы встроить квантовые эффекты в пятимерную модель мира, Клейн воспользовался идеей Луи де Бройля и предположил, что квант действия может происходить из периодичности движения в пятом измерении.[3]

В принципе, одно и то же уравнение периодического движения описывает как равномерное движение точки по кругу, так и линейные – «вверх и вниз» – колебания грузика на пружине (или, скажем, на вибрирующей мембране). Оскар Клейн для своей схемы выбрал движение по кругу и предположил, что дополнительное пространственное измерение свернуто в кольцо очень малого радиуса («компактифицировано»), т.е. что частица, двигаясь по короткому пути вдоль этой оси, очень быстро возвращается туда же, откуда начато движение. Такое допущение давало теоретическое обоснование наблюдаемому в экспериментах квантованию заряда, поскольку волны, направленные вдоль конечной замкнутой оси, могут принимать значения только дискретных частот.

a Попутно идея компактификации довольно остроумно давала ответ и на вопрос о том, почему пятое измерение пространства не наблюдается в повседневной жизни и в опытах физиков. Расчеты Клейна показали, что дополнительное циклическое измерение по размерам чрезвычайно мало и сопоставимо с планковской длиной. То есть на много порядков меньше размера самой маленькой из частиц и потому далеко выходит за рамки современных возможностей не только экспериментального изучения, но и вообще обнаружения.

b Предложенное Клейном объяснение выглядело более естественным и предпочтительным, нежели «цилиндрическое условие» Теодора Калуцы. Очевидный факт того, что еще одно измерение не ощутимо в каких-либо феноменах нашего опыта, сам Калуца пытался объяснить специфической структурой пятимерного пространства. В котором пятое измерение образует как бы центральную ось цилиндра, а точки на поверхности этого цилиндра соответствуют точкам знакомого человеку четырехмерного пространства. Это условие выглядело чересчур формальным и делало пятое измерение совершенно особенным, в корне отличным от четырех остальных. Что сильно не нравилось Эйнштейну и другим исследователям, пытавшимся найти удовлетворительную физическую интерпретацию для многообещающей модели.

###

c Явно интересная идея Оскара Клейна довольно быстро наткнулась на серьезные трудности и противоречия, сильно затормозившие ее развитие. Однако вскоре нашлась новая, существенно иная математическая интерпретация для «теории Калуцы-Клейна (КК)», как стали называть пятимерную модель с начала 30-х годов. Такое название пошло от видного математика-геометра Освальда Веблена (1880-1960), который в 1930 году вместе с Банешом Хоффманом сумел придать этой теории так называемую проективную форму [4]. Переформулировав модель в понятиях четырехмерной проективной геометрии, эти исследователи показали, что «пятимерное пространство» можно считать чистой абстракцией, не подразумевающей никакой физической реальности. Вместо этого оно может выступать как своего рода пространство-каркас, из которого реальное четырехмерное пространство появляется как проекция.

d В итоге этих изысканий для теории Калуцы-Клейна, где используются уравнения полей в пятимерном пространстве, именно Освальд Веблен сумел дать первую вполне внятную физическую интерпретацию пятой координаты. Обратившись к существенно продвинутым к тому времени результатам Германа Вейля по калибровочным полям, Веблен стал рассматривать эту координату как калибровочную переменную, в результате чего 5-мерная теория КК стала выглядеть как теория четырехмерного пространства-времени. (Если вспомнить, что термин «калибр» - Gauge по-английски или Eich по-немецки - применительно к полям пришел в физику из железнодорожного транспорта, где данным словом обозначали несовместимые размеры путевой колеи в разных странах, то можно пояснить суть калибровочных полей примерно такой аналогией. Одни вагоны могут ходить и сцепляться в поезда только на путях с узкой колеей, а другие - только на широких путях. Хотя все эти пути физически находятся в одной плоскости, можно также считать, что «калибровочный» параметр путей создает как бы две параллельные плоскости, в которых перемещаются и стыкуются вагоны с разным «калибром». Соответственно, плоская карта путей становится как бы трехмерной.)

Но сколь бы ни были интересны получавшиеся вокруг теории КК результаты, их было слишком мало для всеобщего признания. В своем начальном виде КК не могла удовлетворить ни теоретическую физику, ни тем более экспериментальную. Все попытки включить в теорию элементарную частицу материи – электрон – приводили к предсказаниям, которые радикально отличались от данных, получаемых в экспериментах. Хуже того, не было видно даже путей к разрешению этой проблемы. Крайне удручало физиков и то, что в КК вообще удавалось выводить лишь те результаты, которые уже были известны и без пятого измерения. Узнать же что-либо новое, практически полезное или хотя бы просто проверяемое экспериментально, не получалось никак. Например, вскоре были открыты еще две фундаментальные силы природы, сильное и слабое взаимодействие, которые теорией КК не только не предсказывались, но и вообще не вписывались поначалу в картину Калуцы-Клейна очевидным образом. И даже для тех вещей, что вписывалось в КК очень красиво, теория КК так и не могла объяснить, почему сила электромагнитного взаимодействия весьма велика, а сила гравитационного взаимодействия фантастически слаба.

Короче говоря, несколько последующих десятилетий в истории физики показали, что чрезвычайно заманчивая и перспективная концепция Теодора Калуцы слишком сильно опередила свое время. Лишь в 1960-х годах начал нарабатываться необходимый теоретический аппарат, позволивший вновь возродить живой интерес к КК. Теория Калуцы-Клейна была существенно развита до большего числа измерений и заложена в основу главных направлений, развивающих физику за пределы Стандартной модели – вроде суперсимметрии и теории струн. Ну а в самом конце 1990-х годов появились работы RS (Рэндалл-Сундрума), где исходные идеи Калуцы о важности дополнительного измерения и современные идеи о брано-мирах удалось свести в существенно новую конструкцию. Которая, во-первых, давала красивое и естественное решение для давней проблемы с иерархией масс, а во-вторых, по ряду ключевых признаков явно перекликалась с загадочным открытием Вольфганга Паули, сделанным им незадолго до смерти.

[1] G. Nordström, Phys. Zeit. 15, 504 (1914)

[2] T. Kaluza, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Math.-Phys. Kl. 33 966 (1921)

[3] O. Klein, Z. Phys. 37, 895 (1926).

[4] O. Veblen and B. Hoffmann. Projective Relativity. Physical Review, 36:810-22. (1930)

Двуделение с деформированной геометрией [86]

Самое простое и доходчивое пояснение проблемы, имеющейся у теоретической физики с иерархией масс и энергий, может предоставить какой-нибудь элементарный наглядный пример. Вроде того, скажем, что даже самый маленький и слабенький магнит без труда удерживает от падения на землю какую-нибудь булавку или скрепку. Если принять во внимание, что вниз к земле эти скрепки-булавки тянет сила гравитации от всей планеты, гигантская масса которой несопоставимо больше какого-то магнетика, то можно понять, сколь существенно различаются масштабы электромагнитной силы и гравитации.

Иначе говоря, для ученых вполне очевидно, что природе по какой-то причине явно понадобилось иметь столь огромный диапазон различий в масштабах масс и энергий. Но вот что это за причина, пока остается загадкой. Квантовая теория поля – самое лучшее, что имеется у науки для объяснения природы в условиях четырех наблюдаемых измерений. А в данной теории для всех частиц во вселенной приходится предполагать массы и энергии примерно одного порядка, поскольку не видно никаких естественных механизмов, которые диктовали бы появление столь гигантских различий.

Введение в картину дополнительных измерений, как уже говорилось, указало теоретикам пути к отысканию естественных объяснений для подобных загадок. И на одном из этих направлений в 1998 году стали совместно работать Лиза Рэндалл и Раман Сундрум, заинтересовавшиеся так называемой моделью секвестирования. Данный подход, как следует из его названия (*sequester* — изолировать, обособлять), подразумевает разнесение существенно разных сил природы по разным мирам-бранам.

Суть модели достаточно проста: если гравитация так сильно отличается от трех остальных фундаментальных взаимодействий — электромагнетизма, слабой и сильной ядерных сил — то не исключено, что она действует по преимуществу на одной бране (получившей имя «гравитобрана»), а мир всех остальных частиц и взаимодействий (где обитает в том числе и человек) находится на другой бране. Где сила гравитации с необходимостью также должна действовать, поскольку распространяется по всему объему многомерного пространства-балка, но уже в сильно ослабленном виде (отсюда название «слабобрана»).

#

Поскольку существование дополнительных измерений пространства по сию пору остается сугубо гипотетическим предположением, не имеющим строгих экспериментальных подтверждений, Рэндалл и Сундрум рассматривали модель, очень минималистично расширяющую наблюдаемую реальность. То есть вселенная у них предполагается пятимерной и ограниченной с двух сторон четырехмерными (3+1) бранами пространства-времени, разделенными вдоль пятого измерения «скромной» величины. (Выбранный авторами термин подчеркивает, что здесь пятое измерение не должно быть большим.)

Лиза Рэндалл и Раман Сундрум наверняка были не первыми, кто взялся исследовать физику такой модели, однако именно им (точнее, Лизе) пришла в голову счастливая идея взглянуть на проблему чуть иначе. Все прежние теории с дополнительным измерением делали упор на то, что браны способны захватывать частицы и силы, однако игнорировали ту энергию, что могут нести в себе сами браны. Но согласно общей теории относительности энергия порождает гравитационное поле, а это означает, что если браны несут энергию, то они сами тоже должны искривлять пространство и время.

Поэтому Рэндалл и Сундрум решили проанализировать, как именно искривляется пространство-время в присутствии двух энергетических бран, которые ограничивают дополнительное измерение пространства. Исследователи решили эйнштейновы уравнения для условий этой двух-бранной конструкции и обнаружили, что игнорировавшаяся прежде энергия бран была действительно очень важна. Получившееся в результате пространство-время оказалось сильнейшим образом деформировано по пятому измерению, что наделяло модель весьма специфическими особенностями.

Среди множества поразительных следствий модели с деформированной (warped) геометрией, открытой исследованиями Рэндалл-Сундрума, оказалось то, что линейные размеры объектов, их масса и даже их время существенно зависят от позиции по оси пятого измерения. По сути дела, деформация пространства и времени в этой двух-бранной конструкции при смещении по пятому измерению похожа на мощные деформации пространства-времени вблизи космических черных дыр. Однако в данном случае, если считать, что на одной из бран (слабобране) находятся частицы из физики Стандартной Модели, то оказывается, они с необходимостью должны иметь малую массу. А это означает, что проблема иерархии решается совершенно естественным и автоматическим образом.[1]

##

Выявленные Рэндалл и Сундрумом особенности двухбранной модели с деформированной геометрией представляются настолько интересными и очевидно перекликающимися с открытием Вольфганга Паули, сделанным за сорок лет до этого («Раздвоение и уменьшение симметрии – вот где собака зарыта!»), что данная конструкция явно заслуживает более подробного рассмотрения. Итак, вселенная здесь имеет 5 измерений пространства-времени, а две браны, ограничивающие пятое измерение, являются совершенно плоскими.

Иначе говоря, если не учитывать измерение времени, то каждая из двух бран похожа на привычный человеку мир — простирается бесконечно далеко в трех пространственных измерениях и выглядит как плоское пространство без каких-либо особенных гравитационных эффектов кривизны. При этом деформированное по пятому измерению пространство-время имеет особое свойство. Не только для бран на концах, но и для всякого слоя, дающего срез пространства через любую точку по оси пятого измерения, геометрия является совершенно плоской. Однако в совокупности все эти слои склеены друг с другом так, что пятимерное пространство очень сильно искривлено. То есть в соответствии с неким «множителем деформации» при переходе в пятом измерении от одной точки к другой в слое сильно изменяется общий масштаб для размеров и местоположения, для времени, массы и энергии.

Одна из многих примечательных особенностей пространства-времени, деформированного подобным образом, заключается в том, что пока объект перемещается от одной браны к другой, его энергия и импульс очень сильно изменяются. А изменение энергий и импульсов, согласно основам квантовой механикой и теории относительности, указывают на то, что соответственно должны изменяться расстояние и время. В геометрической конструкции, которая здесь рассматривается, все ключевые характеристики четырехмерного объекта — размеры, время, масса и энергия — оказываются критично зависящими от точки местоположения по пятому измерению. И хотя значения масс для частиц оказываются очень разными в зависимости от положения в пятом измерении, вся физика при этом неизменно продолжает выглядеть 4-мерной.

В модели Рэндалл-Сундрума показано, что гравитация может быть распределена между бранами чрезвычайно несимметрично и практически вся сосредоточена на Гравитоброне. Поэтому как только происходит отдаление от этой браны, сила гравитации может экспоненциально быстро падать, из-за деформации пространства уменьшаясь в десять миллионов миллиардов раз, становясь ничтожно малой на Слабоброне — даже если две браны расположены друг от друга совсем близко. Иначе говоря, изучая физические свойства своей модели с деформированной геометрией, Лиза и Раман невольно обнаружили естественный механизм для порождения экспоненциальной иерархии масс. Решение проблемы, которая озадачивала физиков на протяжении многих лет, фактически само свалилось им в руки.

###

Но как бы ни была хороша и интересна новая модель, предложенная дуэтом Рэндалл-Сундрум, научное сообщество вовсе не сразу оценило ее достоинства. Одним из препятствий к мгновенному признанию, возможно, было то, что в результатах авторов имелся весьма существенный пробел. Для того, чтобы вся их модель работала, Лиза и Раман изначально подразумевали, что динамика бран неким естественным образом сводится к такому состоянию, когда их взаимное расположение стабильно и разделено неким достаточно небольшим расстоянием. Но вот о том, каким образом это расстояние между бранами устанавливается, ничего сказано не было.

На помощь первооткрывателям пришли два физика из Калтеха [2], теоретик частиц Марк Вайз и его совсем еще молодой в ту пору студент Уолтер Голдбергер. Они стали не только одними из первых, кто проникся красотой и богатством деформированной двухбранной геометрии, но и существенно продвинули теоретическое обоснование модели. Исследование, проделанное Голдбергером и Вайзом, теперь уже вполне строго показало то, что в исходной модели RS подразумевалось как данность — для стабильности в конфигурации бран расстояние между ними должно быть весьма небольшим, но конечным.

При этом ключевая идея, предложенная исследователями, оказалась не просто элегантной и удачной. Более того — по сути любая из стабилизационных моделей, предлагавшихся впоследствии, оказывалась идейно очень близкой к конструкции Голдбергера и Вайза. Сутью же конструкции было то, что в пятимерном объеме-балке помимо безмассового гравитона должна иметься еще одна частица, обладающая массой. А у частицы этой должны быть такие свойства, благодаря которым она действует как пружина. Если говорить о наиболее характерных особенностях в физике такого объекта, то всякая пружина имеет некий предпочтительный для нее размер, а любая меньшая или большая ее длина будет вносить энергию, которая заставляет пружину двигаться в сторону своей оптимальной величины. Введя в модель такую частицу-пружину и соответствующее ей поле, Голдбергер и Вайз показали, что равновесная конфигурация для поля и бран поддерживается при малом — предполагавшемся у RS — расстоянии между бранами.

Хотя это еще и не совсем конструкция Модели с ее 5-мерной протон-электронной «пружиной», общее сходство механизмов уже вполне различимо. Причем сходящиеся-расходящиеся браны рассматривались и в схеме Голдбергера-Вайза. Их решение опиралось на два конкурирующих эффекта - один, который предпочитает широко разделенные браны, и другой, который предпочитает близко сведенные браны. А итоговым результатом конкуренции становится стабильная позиция-компромисс. В целом же механизм стабилизации Голдбергера-Вайза сделал ясным, что *f* двухбранная модель с сильно деформированной геометрией по пятому измерению действительно дает естественное решение для проблемы иерархии масс. Более того, удалось показать, что математика деформированной пятимерной вселенной согласуется с реальными космологическими наблюдениями. Потому что в ситуации, когда положение бран стабилизировано относительно друг друга, для наблюдателя на бране вселенная эволюционирует таким образом, как если бы она была четырехмерной.

-
- [1] Randall L, Sundrum R. «A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension». Phys. Rev. Lett. 83 3370 (1999); arXiv:hep-ph/9905221
- [2] Walter D. Goldberger, Mark B. Wise, «Modulus Stabilization with Bulk Fields», Phys.Rev.Lett. 83 (1999) 4922-4925, arXiv:hep-ph/9907447 ; Walter D. Goldberger, Mark B. Wise, «Phenomenology of a Stabilized Modulus», Phys.Lett. B475 (2000) 275-279, arXiv:hep-ph/9911457

Эволюция бран с элементами мистики [87]

Несложно заметить, что двухбранная конструкция вселенной, появившаяся в совместной работе Лизы Рэндалл и Рамана Сундрума, уже выглядит достаточно похожей на Модель, рассматриваемую в данной книге. Это сходство становится еще более очевидным, если принимать во внимание те уточнения, что были сделаны в исследовании Голдбергера и Вайза. Предложенный ими механизм частицы-«пружины», концы которой расположены на соседних бранах, позволил стабилизировать конструкцию естественным образом и без ввода дополнительных искусственных ограничений на параметры системы.

Переход от этой конструкции к итоговой Модели представляется достаточно простым и логичным. Во-первых, дабы не плодить лишних сущностей, допустить, что две браны на самом деле могут быть краями одной и той же односторонней поверхности типа ленты Мебиуса. Во-вторых, учитывая чрезвычайно деформированную природу пятого измерения между бранами, допустить, что оно принципиально отличается от четырех остальных измерений и в действительности является шкалой вибрационных частот. Ну и в третьих, для равенства зарядов во вселенной, допустить, что концами частицы-пружины, соединяющей браны, являются электрон и протон.

К сожалению, все эти шаги выглядят логичными лишь в том случае, когда заранее известно, какой в итоге должен быть результат. Ну а поскольку за всю историю физики про итоговый результат исследований не было известно практически ничего (кроме, разве что, смутного предположения, что это должно быть нечто воистину восхитительное), то и для теоретиков, заинтересовавшихся открытием Рэндалл-Сундрума, это был лишь один из вариантов решения известных уравнений. Вариант, спору нет, занятный, но вовсе не очевидно, что хоть каким-то боком связанный с окружающим миром.

Есть, правда, в науке весьма радикальная точка зрения, согласно которой все, что извлекается из физических уравнений, так или иначе должно существовать в природе. Однако строго доказать подобное утверждение вряд ли возможно, а исследователям-теоретикам, соответственно, среди бесконечного множества всех вариантов решений в их уравнениях вольно или невольно приходится выискивать такие, которые хоть как-то можно было бы привязать к наблюдениям и экспериментам.

#

По этой причине неудивительно, что с исходной конфигурацией Рэндалл-Сундрума практически сразу стали происходить всевозможные трансформации, в ходе которых исследователи стали делать новые интересные открытия. Так, сами первооткрыватели, Лиза и Раман, в 1999 году обнаружили еще одну примечательную особенность того сильно деформированного пятого измерения, что было обнаружено ими в уравнениях Эйнштейна.

Если прежде физикам, допускавшим существование дополнительных измерений, на протяжении 80 лет приходилось подразумевать, что они должны быть крошечными – дабы объяснить, почему их не удается наблюдать – то Рэндалл и Сундрум нашли существенно иное толкование. Развивая свою конструкцию, Лиза и Раман обнаружили, что в принципе дополнительное измерение не обязано быть компактным – оно может растягиваться сколь угодно далеко, но при условии соответствующих деформаций в искривленном пространстве.

Расчеты Рэндалл-Сундрума показывали, что если гравитационное поле локализовано рядом с гравитобраной, то протяженность пятого измерения – т.е. расстояние до второй браны – оказывается несущественной величиной для наблюдаемой силы четырехмерной гравитации. Более того, гравитация по-прежнему выглядела четырехмерной даже в том случае, когда второй браны не было вообще, т.е. пятое измерение становилось бесконечно протяженным. Рэндалл и Сундрум назвали такой сценарий «локализованной гравитацией». Хотя в принципе гравитация продолжала оставаться пятимерной, практически все, что порождалось на гравитобране или рядом с ней, навсегда оставалось поблизости в ее локальном регионе. Физика сценария напоминала черную дыру, так что вскоре появился термин «черная брана».

Следующая удивительная возможность была обнаружена еще несколько месяцев спустя, когда в 2000 году Лиза Рэндалл и другой работавший с ней коллега, струнный теоретик Андреас Карх, сумели пошатнуть еще один казавшийся прежде незыблемым постулат физики. По давно уже заведенной в науке традиции принято полагать, что вселенная во всех своих регионах имеет примерно одинаковую природу. Однако расчеты Рэндалл и Карха показали, что человек, быть может, живет в особом трехмерном кармане космоса, в то время как вся остальная вселенная ведет себя так, как если бы она имела большее число измерений. Если формулировать ту же мысль в более общих выражениях, то многомерная ткань пространства-времени оказывается такова, что в принципе может состоять из различных регионов, каждый из которых выглядит так, словно он содержит разное число измерений...[1]

##

Еще одна весьма любопытная работа [2], родившаяся в результате совместных исследований Карха и Рэндалл, появилась в 2005 году. Вопрос, поставленный учеными, звучал примерно так. В науке по сию пору не известно никаких фундаментальных физических принципов, которые диктовали бы или как-то особо выделяли три измерения пространства. Но при этом достаточно очевидно, что три пространственных измерения явно имеют в природе особый статус. Естественно задаться вопросом – а почему это так?

В истории науки известно множество попыток ответить на данный вопрос, однако ни один из ответов не признан достаточно убедительным. Карх и Рэндалл решили опереться на физику бран в сочетании с недавно открытым феноменом локализации гравитации – и сумели найти собственный интересный ответ. В модели, предложенной ими, та вселенная, которую человек наблюдает сегодня, появилась в процессе «динамической эволюции» и своего рода естественного отбора среди самых разных бран. То есть Рэндалл и Карх предположили, что в ранней вселенной уже имелось 10 измерений (как требуется в теории струн и бран, но без компактификации), а пространство заполняли браны с самым разным числом измерений от 1 до 9. Эти «листы реальности» разной размерности динамически взаимодействовали друг с другом, а Карх и Рэндалл, соответственно, подсчитали, у каких бран в этих условиях больше всего шансов на выживание. Оказалось, что «доминирующими видами» в этой эволюции оказываются браны с размерностью 3 и 7, а все прочие либо аннигилируют при взаимных пересечениях, либо рассасываются в пространстве.

Результат этого «естественного отбора» выглядел особо интересным по той причине, что именно 3-браны и 7-браны ранее уже были признаны естественной средой для происхождения всех сил в калибровочных теориях поля с материей, включая и суперсимметричную стандартную модель. Следующим важнейшим моментом, намеченным авторами для дальнейшего разбора, стало происхождение именно четырехмерной гравитации, наблюдаемой в природе. Наиболее интересный сценарий для глубокого исследования предоставила, опять-таки, идея о локализованной гравитации. Топологическая конфигурация, предоставляющая естественную модель для появления четырехмерной гравитации – это такое пересечение трех 7-бран, которое имеет три пространственных измерения или, с учетом оси времени, представляет собой брану с пространственно-временной размерностью четыре.

Карх и Рэндалл в общих чертах показали, что в этом случае согласованным и непротиворечивым образом можно получить нужной размерности гравитацию, а также и все прочие фундаментальные силы, локализованные на 3-бранах. Оставалась, правда, проблема с тем, чтобы отыскать естественную причину, почему именно такая конфигурация оказывается предпочтительной. Более тщательное исследование всей этой темы было оставлено авторами для грядущей публикации, однако по состоянию на 2011 год давно обещанная статья так и не появилась. Как, впрочем, больше не было и других совместных работ этого авторского тандема.

###

Рассказ о современных взглядах науки на загадки вокруг размерности пространства, особенно в контексте особой роли чисел 3 и 7, был бы явно неполным, если не упомянуть примечательную работу теоретика Зураба Силагадзе из Новосибирского института ядерной физики. Опубликованная им в 2002 году статья [3] носит название «Фейнмановский вывод уравнений Максвелла и дополнительные измерения». Как можно понять уже по названию работы, она абсолютно никак не касается физики бран или теории струн, однако при этом явно принимает в учет нынешний обостренный интерес к проблемам размерности.

Суть же результатов Силагадзе сводится к тому, что удивительная математическая важность размерности 7 может быть выведена, как выясняется, даже из максвелловских уравнений электромагнетизма. Но для этого надо воспользоваться несколько иным методом вывода, предложенным в свое время Ричардом Фейнманом. Сам Фейнман, правда, в 1948 году использовал этот метод для совсем иных целей – чтобы выстроить основы «новой физики». Однако в итоге вычислений он иными путями пришел к давно известным уравнениям Максвелла, а потому посчитал работу «неудачей» и даже не стал ее публиковать.

Однако, как продемонстрировал Силагадзе, следуя по пути, предложенному Фейнманом, действительно можно прийти к уникальной новой теории – но только если естественным математическим образом сделать многомерное обобщение фейнмановских идей. Иначе говоря, весьма элегантно удастся вывести новые, многомерные максвелловские уравнения, но только для случая размерности 7. Причем попутно автор алгебраическими методами показал, что при данном подходе к задаче имеется всего три варианта для размерности пространства: либо 1 (вырожденный случай), либо 3 (классическая физика), либо 7 (новая физика).

Сам Силагадзе не без юмора обращает внимание читателей на «магическое число 7» и его регулярные появления в самых разных контекстах человеческой культуры. Типа семь чудес света, семь смертных грехов, семь уровней ада, семь музыкальных нот, семь основных цветов, семь дней недели и так далее... Как прокомментировать это совпадение, признается автор, он и сам толком не знает. Однако здесь, в дополнение к теме «магии чисел», можно обратить внимание и еще на одно (с половиной) примечательное совпадение. Последовательность цифр 1-3-7 - это номер палаты, в которой быстро угасал безнадежно больной раком Вольфганг Паули. Ученый, который даже в столь тяжелом состоянии не мог проигнорировать тот факт, что 137 - это цифры константы тонкой структуры, «скрывавшие в себе так и не разгаданные им тайны природы»... И в сумме, кстати, дающие 11 измерений вселенной, соответствующей Модели.

-
- [1] A. Karch, L. Randall, J. High-Energy Phys. 0105, 008 (2001)
 - [2] A. Karch, L. Randall, «Relaxing to Three Dimensions». Phys.Rev.Lett.95:161601, 2005
arXiv:hep-th/0506053
 - [3] Z. K. Silagadze, «Feynman's derivation of Maxwell equations and extra dimensions», Annales Fond.Broglie 27 (2002) 241-256. arXiv:hep-ph/0106235 v2 29 Jan 2002

[8♠] Ева, или Ясновидение среди струн

Пещера и слон [88]

В одном из выпусков EMS Newsletter, журнала Европейского математического сообщества за 2007 год, была опубликована статья [1] с выступлением против завуалированного насаждения мистицизма в современной науке. Автор статьи, далеко не последний в британской научной иерархии деятель, с нескрываемым беспокойством обращал внимание коллег на то, что в последнее время утвердилась нехорошая практика – когда у Филдсовских медалистов (математический аналог лауреата Нобелевской премии) и прочих знаменитых математиков берут интервью для прессы, то непременно заводится разговор о том, являются ли они платонистами.

Так называемый математический платонизм, о котором то и дело упоминают некоторые научные светила, подразумевает несколько разных аспектов мировоззрения, однако (подчеркивает автор) два ключевых элемента обычно присутствуют всегда. Во-первых, это утверждение о том, что имеется некая область вне пределов времени и пространства, где существуют идеальные математические формы и объекты – причем декларируется эта позиция в буквальном смысле. То есть утверждается, что данный мир существует независимо от человеческого общества и продолжал бы свое существование даже в том случае, если бы люди со своей наукой вообще никогда не развились до уровня, позволяющего исследовать эти объекты с их всевозможными взаимосвязями.

Другой ключевой аспект математического платонизма подразумевает определенное заявление относительно того, каким образом функционирует человеческий мозг. Платонисты полагают, что постижение человеком математики подразумевает некий тип восприятия платоновского мира идей. А мозг человека, соответственно, имеет возможность проникать за пределы ограничений физического мира (как он в настоящее время понимается) – хотя обычно получается это не сразу, а после длительного периода интенсивной мыслительной концентрации.

Оппоненты математического платонизма – от лица которых решил выступить автор статьи – считают подобную точку зрения неправильной и, более того, просто вредной. Подобного типа заявления, уверены они, имеют гораздо больше общего с мистическими религиями, нежели с современной наукой. Что, впрочем, и не удивительно, коль скоро хорошо известно, что платонизм в свое время вырос из пифагорейской религии мистерий, в которой важнейшую роль играла математика чисел и фигур...

#

Чтобы позиция другой стороны в этом споре стала более ясна, логично дать слово кому-то из ее представителей. В том же самом бюллетене EMS Newsletter, но в другом выпуске от весны 2008 года, было опубликовано интервью с Аленом Конном [2], выдающимся французским математиком и лауреатом Филдсовской медали, среди многих прочих его регалий. В ходе этой большой беседы, конечно же, зашла речь и о математическом платонизме – как вопрос о взглядах ученого на математику и реальность.

5 В своем ответе Конн подчеркнул, что он безусловный платонист и у него нет абсолютно никаких сомнений относительно действительного существования математической реальности. Причем реальность эта, по его убеждению и опыту, существует не только независимо от мозга человека, пытающегося ее постичь, но также имеет и точно такие же свойства

6 сопротивления познанию, как и реальность внешняя. Когда вы хотите что-то доказать, говорит математик, или когда вы проверяете, верно ли доказательство или нет, то вы чувствуете те же самые мучения, то же самое внешнее сопротивление, как это происходит у вас с постижением внешней реальности.

Что же касается доводов оппонентов, настаивающих на том, будто эта реальность не существует, поскольку она не «локализована» где-либо в пространстве и времени, то Конн находит этот аргумент абсурдным и придерживается диаметрально противоположной точки зрения. Всякий сведущий в физике человек знает, что если хочется свести все к «материи, локализованной где-то», то быстро натыкаешься на стену, возникающую из

7 квантовой механики, и обнаруживаешь, что сведение внешней реальности к материи – это иллюзия, имеющая смысл только на промежуточных масштабах, но никоим образом не на фундаментальном уровне. Соответственно, у Конна нет совершенно никаких сомнений относительно существования иной, более утонченной реальности, которая не может быть ни сведена к «материи», ни «локализована» в пространстве и времени.

Если же затрагивать второй существенный аспект математического платонизма – об особой роли мозга как средства проникновения в иную реальность, то здесь позиция Конна, изложенная с известной долей иронии, выглядит примерно так. Соотношение между выводами математика (которые – великое недавнее открытие – происходят у него в мозге) и

8 математической реальностью похоже на соотношение между выводами, выстраиваемыми в суде, и тем, что действительно происходит в реальном мире. То есть человек, в меру своего владения логикой и инструментами описания, выстраивает из имеющихся фрагментов более-менее связную и доступную для его понимания картину происходящего. Однако должно быть совершенно ясно, что эта картина – отнюдь не сама реальность.

##

В этом пояснении, хотя и сформулированном у Конна для математиков куда более тщательно в терминах теоремы Геделя и аппарата квантификаторов, без особого труда можно разглядеть отсыл к знаменитой платоновской аллегории о пещере. В часто цитируемом пассаже из «Республики» Платона, Сократ и

9 Глаукон беседуют о «реальности» отбрасываемых на стену пещеры теней по отношению к реальности объектов, эти тени отбрасывающих. На этом примере Платон поясняет, что видимое человеком есть лишь тень реальности, идеи же обладают независимым от остального мира существованием.

Понятно, наверное, что если некий образ захватывает умы мудрейших людей на протяжении вот уже более двух тысячелетий, то за этим непременно должно скрываться что-то чрезвычайно важное. Если же при обсуждении этой темы чуть-чуть сместиться от европейской философской традиции в сторону поучительных историй из арсенала восточных мистиков, то явно созвучной «теме пещеры» оказывается известная притча о слоне и слепых мудрецах. Поскольку в литературных источниках можно найти несколько разных версий этой истории, однако суть их всех сводится в общем-то к одному, то можно, наверное, пересказать притчу и вот так – в декорациях платоновской пещеры.

Итак, в некоем обширном подземелье жил своеобразный народ, никогда не покидавший своей обители, а о мире за пределами пещеры судивший лишь по смутным теням, то и дело пробегающим по их стенам. Нельзя сказать, что из пещеры не было выхода, но всякий, кто отваживался ее покинуть, снаружи тут же слеп от избытка света, поэтому выходы подобные считались в народе делом не только опасным, но и вредным. Но вот однажды разнеслась среди публики весть, что снаружи появился некий «слон» – диковинное животное, о котором в пещере никто прежде не слышал и тем более не видал. И вот, чтобы лучше узнать об этом удивительном создании, обитатели пещеры отправили наружу пятерых своих мудрецов – чтобы они все как следует про слона разузнали, а потом и всем остальным рассказали.

Тут же ослепшие от света мудрецы получили возможность тщательно ощупать слона, однако каждому из них достался для изучения лишь фрагмент животного – кому нога, кому хобот, а кому-то хвост, ухо или бивень. По возвращении в пещеру мудрецы честно рассказали землякам все, что они узнали. «Слон большой и плоский, похож на шершавый ковер», сказал ощупывавший ухо. «Слон здоровенный, но круглый в обхвате, словно колонна», сказал тот, кому досталась нога. «Нет, слон скорее похож на гибкую и сильную змею», возразил щупавший хобот. Ну а те, кому достались хвост и бивень, хотя и поведали согражданам, что они там нащупали, но – послушав коллег – с готовностью признали, что в действительности и сами не понимают, с чем им пришлось столкнуться...

###

Именно пять слепых мудрецов в этой версии притчи появились не случайно, а в целях наглядности – чтобы удобнее было перекинуть мостик к проблемам современной физико-математической науки. Среди наиболее продвинутых в математическом отношении областей физики совершенно особое место занимает ныне теория струн. С одной стороны, это теория, амбициозно претендующая на роль «единственного игрока», способного вывести науку на кардинально новый уровень понимания природы. А с другой стороны, это область исследований, в своих математических описаниях мира столь сильно отдаленная от окружающей человека реальности, что пока не способна предложить ни одного эксперимента, который мог бы подтвердить ее правильность в отличие от всех конкурирующих альтернатив.

Несомненно сильной стороной теории струн, выразительно свидетельствующей, что в ней реально имеется некий чрезвычайно мощный потенциал, является тот прогресс, который струнные теоретики обеспечили нескольким направлениям математики, подходя к решению весьма абстрактных математических задач на основе собственных, физических соображений об устройстве реальности. Формулируя в терминах притчи о пещере, можно сказать, что струнные физики оказались более умелыми в интерпретации математических идей (теней на стене), нежели более строгие в своих подходах математики. Однако в начале 1990-х годов бурно развивавшаяся струнная теория оказалась в глубоком кризисе – разными исследователями было «нащупано» и выстроено сразу пять непротиворечивых версий теории, каждая из которых оказалась несовместима со всеми остальными.

В подобные критические моменты истории важнейшую роль в науке играют мыслители-визионеры, за обилием противоречивых и несовместимых деталей способные углядеть-таки путь к единой картине. В середине 1990-х для теории струн такую роль сыграли Эдвард Виттен и Джозеф Полчински. Один – Полчински – обобщил струны до бран, открыв существенно новые горизонты для исследований. Другой – Виттен – на основе теории бран и так называемых дуальностей сумел показать, что пять несовместимых, как всем казалось, теоретических моделей на самом деле являются разными предельными случаями одного и того же «слона». Полная картина этого создания пока что ученым неизвестна, но собственное название – «М-теория» – от Виттена она уже получила.

Дальнейший путь развития для «теории, прежде известной как теория струн» (по остроумному замечанию одного из исследователей) теперь многим представляется как формирование все более отчетливых контуров для единой М-теории, благо приближаться к ней можно с любого из пяти разных концов. Или даже шести, если сразу брать за основу 11-мерную бранную модель Эдварда Виттена. Для целей же настоящей книги наибольший интерес на данном пути представляют работы, в которых струнным теоретикам удается вычлениить характерные черты той Модели, что выстроена здесь. Случилось так, что множество существенных деталей подобного рода удалось углядеть визионеру-женщине. О Еве Силверстейн обычно говорят как об одной из наиболее даровитых представительниц струнной теории во втором поколении, не раз выступавшей соавтором в исследованиях своих более старших коллег, включая Виттена и Полчински.

[1] E. B. Davies. «Let Platonism die». EMS Newsletter. June 2007, pp 24-25

[2] «An interview with Alain Connes», part II. EMS Newsletter. March 2008, pp 29-33

Фазовые переходы с переворотом [89]

0 Пять разных теорий суперструн, созданных в 1980-е годы, сильно озадачили теоретиков. Каждая из этих теорий имела нужный набор свойств и необходимые признаки самосогласованности, однако все они выглядели как описания явно отличающихся друг от друга миров. В модели, получившей название струнная теория типа I, скажем, струны могли быть как замкнутыми в петли, так и разомкнутыми, т.е. иметь свободные концы. Другая модель, где струны были только замкнутыми, разбилась на два класса. Типа IIB, где все петли вращались лишь в одну сторону по часовой стрелке, т.е. имели правую киральность. И Типа IIA, где вращение струн – или, иначе, распространение колебаний по кольцу – допускалось в обоих направлениях, т.е. частицы имели как правую, так и левую киральность.

1 Еще две иных конструкции, так называемые гетеротические струны, отчасти походили на уже упомянутые типы. Но при этом имели совсем уж странную особенность – разное количество измерений у частиц при их вращении по часовой стрелке и в противоположную сторону (откуда, собственно, и название – «гетерос» по-гречески «разные»). Говоря точнее, у правозакрученных частиц размерность пространства была 10, как и во всех прочих суперструнных теориях, однако у левозакрученных требовалось 26 измерений пространства, что было характерно для бозонных струн ранних теорий, появившихся в начале 1970-х годов.

2 В этом озадачивающем результате, можно заметить, содержится прозрачный намек на путь к разгадке тайны о суперсимметрии частиц. Красивое решение непреодолимых иначе проблем физики с помощью суперсимметричных конструкций давно указывает на необходимость строгого попарного соответствия частиц в природе. То есть для каждого фермиона в природе должен, по идее, иметься свой партнер-бозон, а для всякого бозона, симметрично, свой фермион. Беда вот только в том, что реально наблюдать таких суперпартнеров в экспериментах физикам категорически не удается, несмотря на все прилагаемые усилия.

3 Самое же тривиальное объяснение этой загадке может быть в том, что суперсимметричные партнеры бозон и фермион – это просто два разных состояния одной и той же частицы, постоянно и циклически меняющей значение своего спина между целым и половинным (главное родовое отличие бозонов от фермионов). А теория гетеротических струн, соответственно, может свидетельствовать, что такие «колебания» спина сопровождаются периодическими переворотами в киральности частицы и, одновременно, некими загадочными переменами в структуре пространства...

#

4 Все подобные соображения, конечно же, требуют более тщательного разбора и аргументации, но сделано это будет несколько позже. Пока же следует отметить, что теория гетеротических струн, в частности, одна из ее разновидностей под кратким названием «типа HE (Heterotic-E)» или просто «E», и без того вызвала повышенный интерес теоретиков благодаря своим примечательным особенностям. Поскольку разговор к ней будет возвращаться неоднократно, имеет смысл привести полное название данной модели – теория гетеротических суперструн E8xE8 (произносят эту строку символов как «E восемь на E восемь»).

В середине 1980-х годов эту теорию обнаружили и описали четверо исследователей из Принстонского университета – Дэвид Гросс, Джеффри Харви, Эмиль Мартинес и Райан Ром – вошедшие в историю науки под шутовым коллективным именем «Принстонский струнный квартет». Важнейшей особенностью их конструкции было то, что среди всех суперструнных теорий $E_8 \times E_8$ была единственной, которая несла в себе отчетливые признаки физики того мира, что реально окружает человека. Именно этим, собственно, она и привлекла особый интерес у всех прочих струнных теоретиков.

Для того, чтобы пояснить, каким образом E -гетеротические струны моделируют реальный мир, пришлось бы углубляться в математические аспекты теории. Но поскольку здесь необходимости в этом нет, достаточно лишь сказать, что весьма специфического вида калибровочная группа Стандартной модели (наилучшего на сегодня описания мира) красиво вписывается в E_8 , то есть в одну из групп гетеротической теории. Но при этом – еще одна важная особенность модели – в целом окружающий мир, согласно данной суперструнной теории, описывается декартовым произведением двух идентичных групп, откуда и обозначение $E_8 \times E_8$.

В переводе с математического языка на общечеловеческий это означает, что вселенная в этой модели состоит из двух миров – по одному на каждую группу E_8 . Частицы в каждом из этих миров обладают всеми обычными свойствами, подразумевающими способности к взаимодействию друг с другом посредством различных сил. Однако между частицами из разных миров нет прямого взаимодействия, за исключением гравитации. Поскольку гравитационные эффекты, обусловленные веществом «другого» мира, должны проявляться и в мире «этом», данная модель, помимо всего прочего, может предоставлять еще и разгадку для тайны темной материи во вселенной.

##

В своем изначальном виде теория гетеротических струн $E_8 \times E_8$ не подразумевала никаких бран – ни бран-поверхностей для описания мира, ни бран-капель для описания частиц. Однако в ходе второй струнной революции, когда с помощью аппарата бран и выявленных в теориях дуальностей удалось постичь глубинное единство всех пяти суперструнных моделей, появились и возможности для построения более конкретных конструкций, это единство демонстрирующих.

В частности, в совместной работе Петра Хоравы и Эда Виттена, посвященной путям к реализации 11-мерной M -теории, предложенной Виттеном, была показана очень перспективная модель [1]. Авторы обнаружили, что если одно из семи дополнительных измерений в M -теории имеет совсем простую форму – не окружность, а короткий отрезок прямой линии, с обоих своих концов ограниченный так называемыми «бранами края мира», которые сшиты словно две обложки книги, тогда удастся установить прямую связь между гетеротической- E струнной теорией и всеми остальными теориями суперструн.

Эта базовая конструкция из двух бран оказалась настолько богатой и плодотворной, что на ее основе другие исследователи, нередко работающие за рамками теории струн, выстроили множество новых моделей-модификаций, принеся с собой и новые открытия. В предыдущем разделе, например, рассказывалось о двухбранной модели Рэндалл-Сундрума, красиво объяснившей, почему сила гравитации столь сильно отличается от остальных взаимодействий. В одном из следующих разделов будет рассказано о космологической двухбранной модели Стейнхардта и Тьюрока, описывающей циклически расширяющуюся и сжимающуюся вселенную, в которой нет никакого Большого взрыва.

А непосредственно сейчас речь пойдет об интересных результатах, связанных с гладкой переменной (или переверотом) киральности частиц в процессе их фазового перехода из одного мира в другой [2]. Данные результаты в 1997 году были также полученных на основе двухбранной модели Хоравы-Виттена парой других струнных теоретиков – Евой Силверстейн и Шамитом Качру. Общие интересы этих исследователей в области теории струн со временем довели до того, что Шамит и Ева стали мужем и женой. С сутью их открытия, впрочем, данный факт скорее всего никак не связан.

###

Что же имеет к теме самое непосредственное отношение, так это физика весьма своеобразных объектов – псевдочастиц – под названием инстантоны. Поскольку объекты эти родились как очень удобная математическая уловка при решении уравнений квантовой физики, относительно реальности их существования единого мнения у ученых нет. Одни называют инстантоны просто «идеями» или «решениями уравнений движения», другие же предпочитают куда большую определенность, трактуя инстантоны как «особый вид колебаний вакуума» (но при этом обычно не заостряют внимание на том, что колебания происходят во мнимом времени – ибо с природой реального мира подобное допущение сочетается неважно... пока, по крайней мере).

С другой стороны, в конструкции Модели, обрисованной на страницах данной книги, странноватые, на первый взгляд, «инстантонные флуктуации» частиц со всеми их необычными свойствами оказываются не только естественным, но и совершенно необходимым элементом вселенной, где в каждом такте осцилляций параллельные миры меняются местами друг с другом. И если в конкретных физических задачах мнимое время и псевдочастицы, похожие на вихри-солитоны в сверхтекучих жидкостях, но возникающие только на мгновение (откуда и название от английского instant – «мгновенные»), привлекаются лишь по необходимости, вроде объяснения туннельных переходов и других квантовых эффектов, то в условиях Модели «инстантон» – это нечто куда более существенное. Можно сказать, что это одна из обязательных промежуточных фаз в довольно замысловатом процессе непрерывных перескоков частиц между мембранами.

По этой причине особо примечательны все математические подробности подобных переходов, установленные в работе Силверстейн и Качру под названием «Фазовые переходы, изменяющие киральность в 4-мерных струнных вакуумах». В данной статье авторы продемонстрировали, что вопреки общепринятому мнению, пространства с весьма отличающимися характеристиками (вакуумы теории гетеротической струны E8xE8) могут быть тесно связаны друг с другом через фазовые переходы частиц-инстантонов. Причем переходы такого рода непременно происходят через весьма специфическое состояние системы, «точку в пространстве модулей», где вообще невозможно сформулировать какое-либо описание для физики пространства-времени. После сжатия в такую «нетривиальную фиксированную точку» нулевого размера частицы меняют свою киральность на противоположную.

Переформулированный в терминах теории бран, уже получившей к тому времени признание и популярность, этот же процесс фазового перехода со сменой киральности проявил еще несколько существенных подробностей в трансформациях инстантона. В частности, Силверстейн и Качру показали, что сжатие инстантона до нулевого размера сопровождается испусканием фрагмента материи – пятибраны – с одного из «концов мира» куда-то вовне, т.е. в пространство-балк. В терминах Модели, можно напомнить, это соответствует испусканию тахиона, формирующего квантово-голографическую память частицы о данном такте осцилляции. В теоретических изысканиях Силверстейн и Качру, ясное дело, данная картина ничего подобного не означала, однако и сама по себе открывшаяся физика выглядела весьма любопытно. Поэтому на протяжении нескольких последующих лет среди работ Евы Силверстейн совершенно особое место занимали исследования, посвященные тахионам.

-
- [1] P. Horava and E. Witten, "Heterotic and Type I String Dynamics from Eleven dimensions," Nucl. Phys. B460 (1996) 506, arXiv:hep-th/9510209
- [2] Shamit Kachru, Eva Silverstein. «Chirality Changing Phase Transitions in 4d String Vacua». (1997) arXiv:hep-th/9704185

Без паники - тахионы [8А]

В истории столь необычных частиц, каковыми являются тахионы (получившие имя от греческого «тахис» - быстрый), можно отметить немало крутых поворотов. Тот факт, что уравнения квантовой физики в принципе допускают - а значит и предсказывают - существование частиц, движущихся со сверхсветовой скоростью, первым, видимо, отметил еще Арнольд Зоммерфельд. Тот самый Зоммерфельд, который был учителем и наставником множества великих физиков, начиная с Гейзенберга и Паули, и которому довелось установить весьма странный научный рекорд. Свыше 80 раз этого безусловно выдающегося теоретика коллеги выдвигали на Нобелевскую премию, однако лауреатом ее он, увы, так никогда и не стал.

Нет, впрочем, абсолютно никаких свидетельств тому, что одной из возможных причин этой несправедливости мог оказаться интерес ученого к идее существования тахионов. Да и термином таким, строго говоря, Зоммерфельд не оперировал, поскольку собственно название «тахионы» появилось лишь в 1960-е годы, когда уже совсем другие исследователи занялись развитием теоретических конструкций для изучения этих объектов. Однако никто и из этого ряда ученых, надо отметить, Нобелевской премией также не получил. Хотя поводов было достаточно. Например, не секрет, что один из пионеров тахионных исследований Джордж Сударшан (р. 1931) являлся, помимо всего прочего, еще и автором тех основополагающих работ по слабым взаимодействиям и квантовой оптике, на которые опирались результаты ученых, награжденных Нобелевскими премиями, соответственно, за 1979 и 2005 годы.

Чем же именно тахионы оказываются столь неудобными для современной физической картины мира? Неудобными до такой степени, что многие десятилетия как бы игнорируются не только сами тахионы, но даже (неосознанно?) обходятся вниманием все прочие заслуги исследователей, глубоко этими вещами интересующихся? С самого начала новой физики, как только появилась специальная теория относительности Эйнштейна, был принят самоочевидный постулат, согласно которому никакой объект или частица, никакой переносчик информации не должны перемещаться быстрее, чем свет. Причина данному запрету в том, что в противном случае появлялись бы системы отсчета, для которых тахионный объект движется не только быстрее света, но и фактически путешествует обратно во времени. Но тогда, по идее, должен нарушаться принцип каузальности - основа целостного взгляда науки на природу, управляемую причинно-следственными связями. И залог того, что в мире невозможны абсурдные ситуации, вроде путешествий в прошлое и убийства собственной бабушки еще до того, как у нее родится ваша мать.

На сегодняшний день в рамках физического мейнстрима, т.е. квантовой теории поля, для откровенно неудобной ситуации с тахионами придуман стандартный набор «лечения». Во-первых выдвинуты разного рода теоретические аргументы, согласно которым тахионы просто не могут быть реальными частицами со сверхсветовыми скоростями, а потому являются не более чем математическими абстракциями - квантами полей с мнимыми массами и во мнимом времени. В таком своем качестве абстрактные тахионы указывают на нестабильность тех теоретических моделей, в рамках которых они появляются. Избавляются же от нестабильных тахионных полей по рецепту, давно уже ставшим стандартным, - используя идею тахионной конденсации. То есть, упрощенно говоря, конструируют тот или иной формальный механизм, переводящий систему с тахионами из неустойчивого состояния с максимумом энергии в стабильное состояние энергетического минимума. Где тахионы как бы «оседают в конденсат», и квантов поля с мнимой массой как бы уже не обнаруживается...

Несмотря на все теоретические аргументы против существования тахионных частиц, в экспериментальной физике так и не удалось обнаружить никаких свидетельств, опровергающих или же, напротив, подтверждающих факт существования таких объектов. С другой стороны, частицы с характерными признаками тахионов стабильно возникают как решения уравнений на направлениях, пытающихся продвинуть физику за пределы Стандартной модели. В частности, проявились тахионы и в струнной теории – причем уже на самом раннем этапе ее рождения в конце 1960-х и начале 1970-х годов.

В первоначальной бозонной струнной теории ее замкнутые струны могли вести себя не только как массивные частицы или как гравитоны, но также и как тахионы. Подобно известной ситуации в теории поля, и здесь появление тахионов также сигнализировало о нестабильности – причем всего пространства-времени в целом. Поэтому струнные теоретики, так и не сумев отыскать минимум потенциала, стали притворяться, что столь неудобных частиц просто нет. В середине 1970-х годов на смену бозонной струнной теории пришла куда более привлекательная конструкция суперсимметричных струн. Теория суперструн не только описывала помимо бозонов еще и вторую важную половину элементарных частиц, фермионы, но также позволила избавиться от тахионов. Математический формализм для описания суперсимметрии пространства в этой теории обладает такой спецификой, что энергия здесь в принципе не может быть отрицательной, а потому тахионы с их характерными особенностями просто не возникают. Эта формальная уловка оказалась настолько кстати, что о тахионах в струнной теории предпочитали не вспоминать вплоть до конца 1990-х годов.

Лишь к 1998 стали находиться исследователи, у которых хватило смелости и умения продемонстрировать, что и в суперструнной теории тахионы также обнаруживаются, если не делать вид, что их нет. Например, если рассматривать нестабильные конфигурации бран или определенные способы компактификации дополнительных измерений. Первым струнным теоретиком, вплотную занявшимся ролью тахионов, стал Ашок Сен. Он сосредоточился на конфигурации из двух параллельных, почти совпадающих бран и рассмотрел в этой системе судьбу тахионов вида «открытая струна», т.е. струн, одним концом прикрепленных к одной бране, а вторым к другой. Расчеты Сена показали, что в нестабильных ситуациях, когда в системе появляются тахионы открытых струн, происходит взаимоуничтожение бран через аннигиляцию, тахионы становятся конденсатом, а вся система переходит в устойчивое состояние с точно вычисляемым минимумом энергии. Причем, что особенно производило впечатление, количественно это оказался именно тот минимум энергии, который ранее уже был предсказан в струнной теории поля.

Что происходит со стабильными конфигурациями бран при ситуациях с появлением тахионов вида «замкнутая струна», установить оказалось значительно сложнее. Одной из первых работ, предложивших путь к решению данной проблемы, стала статья Алана Эдамса, Джо Полчински и Евы Силверстейн, появившаяся в 2001 году и не без озорства озаглавленная «Без паники! Тахионы замкнутых струн»[1]. Авторы этого исследования продемонстрировали ситуацию, когда тахионы не разлетаются по всему балку, а локализуются в определенных местах деформации браны, имеющих, упрощенно говоря, форму вихревой конической ямы – в так называемых перекрученных секторах орбифолдов. Было показано, что хотя на острых наконечниках конусов образуются тахионы замкнутых струн, сопутствующий процесс конденсации происходит тут же, из-за чего происходит сглаживание наконечника, он становится плоским, а система, соответственно, не теряет стабильность...

##

8 Спустя несколько лет Эдамсу и Силверстейн в содружестве с еще тремя коллегами (X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman) удалось значительно продвинуть этот результат – на его основе было продемонстрировано, что тахионы замкнутых струн могут играть важную роль в переменах геометрии пространства-времени. В частности, они показали, что если порождаемая вихрем сингулярность на поверхности пространства-времени имеет форму не конуса, а тонкой вихревой трубки (или, как именуют это топологи, «ручки»), которая соединяет две области поверхности, то дальнейшая динамика процесса с участием тахионов приводит к очень существенным изменениям в топологических свойствах пространства.[2]

9 Было установлено, что в данном случае процесс тахионного распада ведет к двум важным метаморфозам. Во-первых, утончающаяся «ручка отваливается», что ведет к потере рода или, выражаясь попроще, к исчезновению «дырки» на римановой поверхности. А во-вторых, сама риманова поверхность распадается на два отдельных компонента. Оба этих следствия вытекают из специфической энергетики искривленного пространства-времени, когда область пространства с отрицательной кривизной расширяется, а область с положительной кривизной, соответственно, сжимается. Попутно авторами работы сделан вывод, что динамически данный процесс должен быть очень эффективным, однако тут же они указывают и на большую проблему, которая при этом порождается.

a Образование тахионов, отмечаемое в области трубок струнного масштаба, происходит вместе с разделением пространства-времени на две такие части, между которыми исчезают взаимодействия и, соответственно, причинно-следственные связи. Иначе говоря, две части пространства, только что бывшие единым целым, продолжают оставаться вроде бы совсем рядом друг с другом, однако уже как параллельные или «каузально разъединенные» миры. Более того, в процессе данного распада исследователями была выявлена новая и довольно необычная частица – имеющая спин 2, как у гравитона, однако со специфической «продольной модой, разъединенной в конечном состоянии».

b Если для авторов статьи, обнаруживших всю эту динамику благодаря интуитивным догадкам и качественному анализу уравнений струнной теории, итоговая картина оказалась весьма странной и неожиданной, то для сконструированной здесь Модели она представляется совершенно естественной. Как своего рода более строгое математическое обоснование отдельных фаз в мире из двух постоянно сходящихся, меняющихся местами, и вновь расходящихся мембран. Где в каждом такте парная частица-трубка при своем перевороте излучает в одну сторону «гравитон», который для каждой из двух мембран представляется лишь одной своей «половинкой» или фотоном. А в другую сторону излучаются тахионы, покидающие поверхность мембран, но тут же образующие дополнительные, так называемые «пылевые» вакуумы, отделенные от бран и выполняющие роль квантовой памяти частиц...

###

c Помимо множества «визионерских наблюдений», далеко не все из которых здесь упомянуты, данная статья Силверстейн, Эдамса и их коллег выделяется среди прочих еще и довольно необычным финалом. Когда данная работа уже оформлялась для публикации, кто-то из ее соавторов – догадайтесь, кто именно – обратил внимание на удивительно созвучные их результатам строки в одном из самых известных произведений ирландского поэта и драматурга Уильяма Батлера Йейтса (1865-1939). Это стихотворение, датированное 1921 годом, выдержанное в духе мрачного мистического пророчества и носящее название «Второе пришествие», начинается таким словами: «Кружась и кружась в расширяющейся воронке / Не слышит сокольного сокол / Распадаются связи вещей, и центр их не удержит / Мир погружается в хаос анархии»...

d Весьма впечатленные созвучием идей и параллелизмом образов, авторы исследования не смогли удержаться от такого (юмористического, конечно же) комментария: «Мы заметили, что наши результаты были отмечены в провидческой работе Йейтса. В приложении мы воспроизводим его аргументы с их трансляцией в более современные обозначения. Отметим, что анализ Йейтса применяется к более широкому спектру обстоятельств».

e Для окончательного названия статьи была взята строчка из стихотворения – «Распадаются связи вещей: Перемена топологии от намотанных тахионов». А кроме того, собственное – глумливо-метафизическое – имя получило и соответствующее приложение к статье: «К трансформативной герменевтике струнной теории». Наряду с полным текстом пророчества Йейтса там приводится примерно такой его парафраз применительно к области теоретической физики: «Порожденное вихрем, происходит разъединение причинно-следственных связей, вызываемое процессом тахионной конденсации и сопровождаемое взрывом продуктов распада – из-за чего возникает множество серьезнейших проблем».

f Обнаруженное исследователями раздваивание мира с вроде бы очевидным нарушением каузальных связей оказалось, похоже, слишком значительным препятствием для дальнейших продвижений в данном направлении. Как и полвека назад в исследованиях Вольфганга Паули, принципиально важный барьер и в этом случае оказался непреодоленным. Но это, впрочем, ничуть не помешало другим струнным теоретикам продолжать восстановление остальных частей общей картины.

-
- [1] A. Adams, J. Polchinski and E. Silverstein, «Don't Panic! Closed String Tachyons in ALE Spacetimes». JHEP 0110, 029 (2001) [arXiv:hep-th/0108075]
- [2] A. Adams, X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman, E. Silverstein. «Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons». JHEP 0510, 033 (2005) [arXiv:hep-th/0502021]

Тахионный кристалл [8B]

0 Весной 1994 года, аккурат на заре «второй струнной революции», один из главных лидеров революционных свершений в современной физике, Джо Полчински, опубликовал очередную исследовательскую статью в соавторстве с исландским теоретиком Ларусом Торлациусом [1]. В отличие от других, куда более знаменитых работ Полчински того периода, посвященных D-бранам, эту статью обычно вспоминают несоизмеримо реже, считая, вероятно, не столь важной и значительной. Однако именно в данной работе появилось первое упоминание о «тахионном кристалле» – ныне «хорошо известной, но в каком-то смысле загадочной структуре в струнной теории» (цитируя одну из научных статей 2010 года).

1 Туманный смысл этой характеристики и степень загадочности данной структуры может проиллюстрировать хотя бы такой наглядный пример. За двадцатилетнюю историю электронного интернет-архива препринтов, arXiv.org, где каждый месяц публикуются на английском языке тысячи статей физиков со всего мира, словосочетание «tachyonic crystal» по состоянию на лето 2010 встречалось всего-навсего в двух работах... Первый раз, как несложно догадаться, в исследовании Полчински и Торлациуса за 1994 год, а второй раз в 2010 году – в статье американского теоретика Гарри «Хэнка» Тэкера (Harry B. Thacker), откуда и процитированы слова об этой «хорошо известной, но загадочной структуре».

2 И коль скоро сам Г.Б. Тэкер занимается не теорией струн, а исследованиями так называемых решеточных моделей квантовой теории поля, представляется несомненным, что струнным теоретикам по каким-то своим причинам явно не нравится термин «тахионный кристалл». Ну а здесь же, напротив, это название представляется более чем уместным. Потому что, во-первых, согласно Модели квантовая голографическая память всей материи во вселенной построена на основе жидкокристаллической структуры из тахионов. А во-вторых, потому что начиная с работы Полчински и Торлациуса множеством физиков-теоретиков,двигающихся к истине разными путями, постепенно воссоздаются детали о такой структуре в основе «вакуума», для которой лучшего названия и не подобрать.

3 Примечательно и то, в каком именно контексте термин «тахионный кристалл» родился у Полчински и Торлациуса. Ученые исследовали одну из популярных игрушечных моделей струнной теории – именуемую граничной конформной теорией поля (BCFT) для случая 2-мерного пространства-времени. Самое существенное в данной «игрушке» то, что у пространства имеется граница, т.е. оно описывается как D-брана, а на эту брану периодически воздействует некое внешнее поле. Или, если в очередной раз вспомнить исходные условия Модели, рассматривается упрощенная версия физики для гранулированной среды, подвергаемой регулярным колебаниям-встряиваниям. Переформулировав задачу в терминах теории струн, авторы показали, что в данном случае BCFT можно интерпретировать как периодический тахионный фон открытой струны. При этом энергетический спектр частиц в условиях периодически меняющегося потенциала разделяется на характерные дискретные полосы, анализ которых свидетельствует о физике струн, движущихся в тахионном кристалле.

#

4 Принимая во внимание общую непопулярность темы тахионов в струнной теории того периода, вряд ли имеет смысл гадать, почему этот любопытный результат поначалу не вызвал повышенного интереса у коллег и, соответственно, дополнительных исследований феномена. Пик содержательных работ о роли тахионов в струнной теории, в основном благодаря усилиям Ашока Сена и его единомышленников, наступит значительно позже, примерно к 2002 году. Причем в то же самое время, что особо интересно, весьма важные и созвучные открытия начинают происходить и в существенно иной области теоретических исследований, где разрабатывается направление решеточных калибровочных полей.

5 Дальнейшее развитие Стандартной Модели в направлении калибровочных полей на решетке, если в двух словах, сводится к тому, что вместо непрерывного пространственно-временного континуума здесь теоретики оперируют дискретным пространством-временем, похожим на 4-мерную решетку. Такой подход имеет множество привлекательных сторон, поскольку естественным образом снимает известные проблемы теории, вроде проблемы расходимостей или бесконечно больших значений в уравнениях поля, и позволяет достаточно полно решать иначе неразрешимые задачи вроде проблемы конфайнмента, т.е. невылетания кварков, в квантовой хромодинамике (КХД).

6 Специфической особенностью этого подхода является то, что для отыскания решений крайне сложных уравнений здесь обычно применяются не аналитические методы, а интенсивные компьютерные вычисления-эксперименты «в лоб» – так называемые численные расчеты методом Монте-Карло. Именно такой подход в 2002-2003 гг. применила для исследований и довольно большая международная группа теоретиков, возглавляемая словацким физиком Иваном Хорватом. Изучая распределение топологического заряда в 4-мерной чисто-глюонной системе КХД, эта команда получила весьма удивительный результат. Было обнаружено, что плотность топологического заряда в вакууме равномерно распределена по двум тонким, протяженным и соединенным друг с другом структурам – когерентным «листам» противоположного знака, которые благодаря изгибам и складкам занимают собой практически весь объем – около 80 процентов – 3-мерного мира.[2]

7 Чтобы попроще объяснить достаточно нетривиальную суть понятия «топологический заряд системы», можно прибегнуть к иллюстрации из физики осциллонов в гранулированной среде, подвергаемой колебаниям. Здесь топологический заряд системы определяется количеством осциллонов на поверхности, поскольку число их можно считать величиной постоянной, если не прикладывается дополнительное воздействие извне. Когда осциллон находится в стадии ямы, это считается положительным вкладом в топологический заряд, а когда в фазе пика – отрицательным вкладом. Группа же Хорвата установила, что (в условиях изучавшейся ими системы) две сцепленные мембраны топологического заряда находятся в когерентном состоянии единой структуры, состоящей из протяженного дипольного слоя – когда на одном листе заряд положительный, то на другой отрицательный. И наоборот.

##

8 Параллельно с этим открытием необычной структуры в строении вакуума для условий квантовой хромодинамики на решетке, целый ряд созвучных результатов был получен в струнной теории. К 2003 году, т.е. практически десять лет спустя после работы Полчински-Торлациуса, струнные теоретики уже давно перестали избегать тахионы в своих исследованиях, а получаемые при этом результаты то и дело приносили неожиданные сюрпризы.

9 Когда в общих чертах было установлено, что всякая D-брана является нестабильной из-за присутствия в ее спектре тахионов, а стабильность системы достигается через удаление тахиона и его «скатывание» к минимуму энергии, особый интерес стала вызывать реальная физика процесса. То есть каким образом все это могло бы происходить не на абстрактном уровне уравнений, а в природе и в реальном времени. Несколько аналитических статей Ашока Сена, в частности, продемонстрировали этапы последующей эволюции тахиона во времени, которая ведет к порождению некоей лишенной давления жидкости, или флюида, получившего название «тахионная материя».[3]

a После чего, весной 2003 года, практически одновременно появились две независимых исследовательских работы, в которых удалось уточнить ряд особенностей этой новой «тахионной материи», одновременно демонстрирующей свойства жидкости и кристалла. Одна команда (N. Lambert, H. Liu, J. Maldacena) сосредоточилась на проблеме устойчивости этого флюида, и показала, при каких именно условиях распад браны и излучение тахионов приводят к стабильной конфигурации на основе замкнутых струн.[4]

b Статья другого коллектива авторов (D. Gaiotto, N. Itshaki, L. Rastelli) посвящена изучению особого частного случая, совмещающего в себе свежие результаты Сена и давнюю работу Полчински-Торлациуса. Исследователи показали, что в условиях BCFT, т.е. при периодическом возбуждении системы на границе, имеется некое критическое значение для частоты «встряхивания» – когда описание физики системы приобретает особенно простую форму. В этих условиях флюид тахионной материи, состоящей из замкнутых струн-колечек, становится более упорядоченным и формально оказывается эквивалентен массиву D-бран, расположенных во мнимом времени. Иначе говоря, вновь проявились черты жидкого «тахионного кристалла», в котором физика на замкнутых струнах – еще один сюрприз – оказывается точным дуальным отображением физики на открытых струнах, характерной для браны-поверхности.[5]

###

c Хотя авторы данного исследования в своей работе предоставили собственную интерпретацию того, как следует понимать довольно загадочную конструкцию под названием «массив D-бран в мнимом времени», намного более ясную – и впечатляющую единством – картину продемонстрировала статья Гарри Б. Тэкера, появившаяся летом 2010 года. В свое время Тэкер работал в группе Ивана Хорвата, открывшей двухслойную мембрану, глобально заполняющую вакуум в решеточной КХД. В последующие же годы особый интерес Тэкера стала привлекать все более очевидная аналогия между их конструкцией, обнаруженной в теории полей на решетке, и похожей структурой из массивов D-бран, возникающей в разделе теории струн, занимающемся так называемой голографической КХД.[6]

Обобщив все эти наблюдения и сопоставив соответствующие расчеты, Тэкер показал, что и в том, и в другом случаях с разных точек зрения изучается одна и та же по сути дела конструкция. Те тонкие и протяженные «листы» решеточной КХД, что собраны в слоеный, перемежающегося топологического заряда сэндвич, имеют совершенно естественную интерпретацию в голографической КХД. Здесь эти когерентные листы противоположного топологического заряда выступают как D-браны. А точнее, как регулярный, переменного знака массив из D6 и анти-D6-бран, возникающий как финальное состояние распада D7-браны, заполняющей пространство и отслаивающей тахионные моды струны. При такой интерпретации, как показал Тэкер, имеются все основания, чтобы называть этот слоеный или ламинированный массив мембран стабильным «тахионным кристаллом». [7]

Очевидное несоответствие в числе измерений пространства-времени для сопоставляемых моделей представляется несущественным, поскольку в теории струн давно выработан стандартный подход к снятию этой проблемы. Обоих видов мембраны, шестимерная D6-брана и семимерная D7-брана, считаются обернутыми вокруг 4-мерной сферы, и таким образом в 4-мерном пространстве-времени выглядят как 3- и 4-мерные объекты, соответственно.

Если же - в качестве заключения - сопоставить выявленную теоретиками структуру «тахионного кристалла» с уже имеющейся в Модели конструкцией квантовой голографической памяти для материи, то можно отметить еще две немаловажных детали-соответствия. Во-первых, как было установлено Хорватом, Тэкером и их коллегами, толщина мембран в «сэндвиче» является предельно тонкой - в типичных случаях всего один или два шага решетки (расстояние между слоями диктуется частотой периодического возбуждения мембраны). Во-вторых, в сердцевине слоеной конструкции вакуума выявлен своего рода «скелет», сформированный энергетически наиболее интенсивными точками пространства-времени. Скелет, образованный этими точками, локально является одномерным, но организован в единую глобальную структуру, охватывающую все пространство... До выявления сдвоенно-спиральной, наподобие ДНК, структуры элементов этого скелета дело пока не дошло, но осталось, судя по всему, уже совсем немного.

-
- [1] J. Polchinski, Larus Thorlacius. «Free Fermion Representation of a Boundary Conformal Field Theory». Phys.Rev.D50:622-626, 1994. [arXiv:hep-th/9404008]
 - [2] I. Horvath et al. «Low-dimensional long-range topological charge structure in the QCD vacuum», Phys. Rev. D68: 114505 (2003) [arXiv:hep-lat/0302009] ; «Inherently Global Nature of Topological Charge Fluctuations in QCD». Phys. Lett. B612: 21 (2005) [arXiv:hep-lat/0501025]
 - [3] A. Sen, “Rolling tachyon,” JHEP 0204, 048 (2002) [arXiv:hep-th/0203211] ; A. Sen, “Tachyon matter,” JHEP 0207, 065 (2002) [arXiv:hep-th/0203265] ; A. Sen, “Field theory of tachyon matter,” Mod. Phys.Lett. A 17, 1797 (2002) [arXiv:hep-th/0204143]
 - [4] Neil Lambert, Hong Liu, Juan Maldacena. «Closed strings from decaying D-branes». JHEP0703:014,2007. [arXiv:hep-th/0303139]
 - [5] Davide Gaiotto, Nissan Itzhaki, Leonardo Rastelli. «Closed Strings as Imaginary D-branes». Nucl. Phys. B688: 70 (2004). [arXiv:hep-th/0304192]
 - [6] H. B. Thacker. «D-branes and Topological Charge in QCD». (2005) 324. [arXiv:hep-lat/0509057]
 - [7] H. B. Thacker. «Tachyonic crystals and the laminar instability of the perturbative vacuum in asymptotically free gauge theory». Phys.Rev.D81:125006,2010. arXiv:1001.4215 [hep-th]

[8♣] Фотини, или Эволюция гравитации

Петли и сети [8С]

0 Результаты исследований на передовых рубежах современной теоретической физики можно трактовать по-разному – как выдающиеся достижения, как интересные открытия, или, скажем, как новые загадки. Но что за слова ни выбирай, итоговая картина все равно оказывается довольно унылой. Потому что шизофреническая ситуация в науке, когда исследователям для описания мира приходится использовать фактически «две физики», принципиально несовместимые друг с другом, по-прежнему остается неопровержимым фактом. Как и 30, 50, 80 лет назад для микромира используется квантовая физика, а для макрокосмоса – общая теория относительности, по сути своей являющаяся классической, а не квантовой теорией.

1 Медицинский термин «шизофрения» для характеристики этого раздвоенного состояния в коллективном сознании науки, быть может, и является достаточно адекватным, но есть в нем что-то такое обидное. Слишком уж откровенно этот диагноз подчеркивает застарелую хворь физики. Поэтому куда чаще сложившуюся ситуацию предпочитают называть как-нибудь поддипломатичнее и без тревожных медицинских аналогий – например, парадоксом. Для которого, вне всяких сомнений, в конечном счете удастся таки найти логическое (математическое, физическое) разрешение. Иными словами, непротиворечиво и согласованно объединить столь нестыкующиеся ныне теории.

2 Поскольку парадоксальные результаты в научных изысканиях – дело далеко не новое, люди уже довольно давно нашли вполне эффективный общий метод для решения подобного рода проблем. Суть данного метода сводится к тому, чтобы тщательно изучить все исходные, несформулированные в явном виде допущения, и отыскать среди них такое, которое на первый взгляд кажется самоочевидным, однако при более глубоком и строгом рассмотрении в действительности оказывается ложным. Иначе говоря, западней и ловушкой, приводящей в тупик неразрешимых противоречий. И как только это удастся постичь, убрав вроде бы очевидный, но по сути своей ложный посыл, то парадокс естественным образом исчезает.

3 Если говорить конкретно о тупиковой ситуации в деле объединения «двух физик», то, по мнению многих исследователей, изначально ложным посылом, запутавшим всю картину, является по умолчанию подразумеваемая непрерывность пространства и времени. В силу давно сложившейся в физике традиции, а также из-за технических особенностей широко применяемого здесь аппарата дифференциального и интегрального исчисления, принято считать, что интервалы расстояний и времени можно дробить практически бесконечно до сколь угодно малых величин. Экспериментально проверить это допущение невозможно, но на протяжении веков оно очень помогало ученым при отыскании верных ответов, а потому считается безусловно истинным.

#

4 В начале XX века, когда наука открыла квантовую природу энергии и зернистое строение материи, состоящей из гранул-атомов, предпринимались попытки развить эти результаты также на пространство и время. Иначе говоря, выдвигались предположения, что и пространство-время в конечном счете может оказаться не сплошным и непрерывным, как это принято считать, а состоящим из гигантского множества дискретных фрагментов, раздробить которые на что-то еще меньшее уже в принципе невозможно.

5 Однако развитие физической науки, как известно, двинулось в существенно ином направлении. Идеи о гранулированной структуре пространства слишком явно перекликались со старомодными «викторианскими» гипотезами об эфире как вихревой губке, а новая физика определенно решила обойтись без эфира, оперируя идеями полей и вакуума. Так что в самой основе своей и квантовая физика, и – тем более – общая теория относительности Эйнштейна изначально подразумевают непрерывную структуру пространства-времени, которое можно дробить до сколь угодно малых величин.

6 В поздних работах некоторых из творцов новой физики имеются свидетельства, что на уровне интуиции они чувствовали, в каком именно месте был предпринят, возможно, неверный поворот. В частности, у Альберта Эйнштейна и у Эрвина Шредингера в трудах 1950-х годов можно найти строки, где они признают, что абстрактно-математическая гипотеза о непрерывности для реальной природы оказалась, возможно, чрезмерной, а итоговое описание реальности в конечном счете может оказаться дискретным...

7 Конкретных путей к выходу из тупика, впрочем, в этих работах не предлагалось, да и мало кто из молодых склонен, как известно, прислушиваться к ворчанию и сетованиям патриархов. Потрясающая способность квантовой теории поля к предсказанию исходов экспериментов обеспечила ей репутацию безусловно верной. Поэтому и в послевоенной физике еще несколько десятилетий предпринимались неоднократные попытки отквантовать уравнения гравитации по тем же лекалам, с помощью которых были успешно выстроены квантовые теории электромагнетизма и прочих взаимодействий. Нет нужды, наверное, подчеркивать, что все эти подходы по умолчанию подразумевали идею непрерывности пространства, а попытки, соответственно, закончились фактически полной неудачей.

##

8 Заметного прогресса в квантовании гравитационных уравнений общей относительности удалось достичь лишь во второй половине 1980-х годов благодаря новаторской работе индийско-американского теоретика Абхая Аштекара [1]. Его важное открытие, среди коллег получившее название «переменные Аштекара», в конечном итоге позволяет строго, на твердой математической основе развернуть физику к дискретному взгляду на пространство-время. Кроме того, в исследованиях Аштекара и его коллег можно углядеть несколько важных моментов, которые в некотором смысле являются возвратом к точкам бифуркации в истории науки. То есть к тем развилкам, где один путь скорее всего ведет в тупик, а второй – к череде новых открытий.

Одна из таких «развилок» – давняя работа немецкого теоретика Теодора Калуцы, который еще на заре ОТО переформулировал уравнения Эйнштейна для случая пятимерного пространства-времени и показал, что тогда они красиво раскладываются на две части. Одна из которых описывает гравитацию и геометрию вселенной, а другая часть представляет собой уравнения Максвелла для электромагнитных взаимодействий. Уже этот результат можно было трактовать как подсказку, что фотон – т.е. переносчик электромагнетизма – одновременно каким-то образом участвует в гравитации, а значит, и в формировании геометрии пространства. Эта идея, однако, не получила должного развития, а открытие Калуцы в истории осталось, главным образом, как предтеча многомерной теории струн.

Абхай Аштекар также попытался по-своему переформулировать уравнения ОТО, путем изобретательного ввода новых переменных сумев обойти хорошо известные технические проблемы, приводившие прочих теоретиков к бесконечностям и к неразрешимому усложнению задачи. Благодаря «переменным Аштекара» задачу квантования гравитации действительно удалось свести к существенно более простым уравнениям. И что было особо приятно, вид этих уравнений оказался по сути таким же, как и в теории калибровочных полей – одной из наиболее продвинутых разновидностей квантовой теории поля, положенной в основу Стандартной Модели частиц.

Помимо этого, разработанный Аштекаром формализм продемонстрировал и весьма интригующую «асимметричную» особенность его новых переменных. Для частиц, передающих взаимодействия, таких как фотон и гравитон, одной из важных квантовых характеристик является спин. Знак спина – плюс или минус – характеризует их спиральность, т.е. направление вращения частиц в правую или левую сторону. В обычных теориях электромагнетизма и гравитации этот знак киральности у нейтральных частиц-переносчиков не играет никакой роли. Однако в формализме Аштекара правое и левое вращение трактуются существенно по-разному. Иначе говоря, частицы, вращающиеся в одну сторону, оказываются для физики более существенными чем те, что вращаются в другую. А это означает, что и тут, похоже, удалось выявить некую очень глубоко скрытую киральную асимметрию в строении природы – наряду с давно известной, но по сию пору не очень понятой аналогичной асимметрией правого и левого в слабых взаимодействиях.

###

Самым же главным итогом открытия Аштекара следует, наверное, считать рождение так называемой «петлевой квантовой гравитации» (ПКГ) – теории, предложившей новый взгляд на строение пространства-времени. Оперевшись на формализм Аштекара, двое молодых в ту пору исследователей, Карло Ровелли и Ли Смолин, в конце 1980-х годов решили поглубже исследовать, что интересного могут сказать о микроструктуре пространства уравнения гравитации Эйнштейна, переписанные в новом виде. К своему глубокому удовлетворению, в итоге расчетов ученые обнаружили, что минимальные площади и объемы областей, выделяемых в пространстве, не могут быть произвольно малыми. А мельчайшая величина линейного размера, диктующая пределы уменьшения площади и объема, оказывается непосредственно связанной с главными константами вселенной – скоростью света, гравитационной постоянной, постоянной Планка – и именуется «планковской длиной» (10^{-35} метра). [2]

Попутно можно отметить, что весь ход построения теории ПКГ хотя и в неявном виде, но воссоздает черты вихревой микроструктуры пространства. Сам термин «петлевая» в названии теории отсылает, по мысли ее создателей, к силовым линиям поля, которое замыкается в микроскопические петли при отсутствии в пространстве материи. Если же оперировать не абстрактными полями, а более реалистичными вихревыми движениями энергии, то микроскопические петли мельчайшего размера оказываются теми самыми вихрями-гранулами, что образуют вихревую губку пространства.

«Микровихревая» физика теории обозначилась еще более отчетливо, когда Ровелли и Смолин – не очень довольные излишней сложностью их результатов в записи через петлевой базис – стали искать иной формализм, который предоставил бы более простую и ясную картину. Вскоре такой вариант действительно удалось найти, причем оказалось, что данную конструкцию под названием «спиновые сети» уже довольно давно, в 1960-е годы разработал британский математик и физик Роджер Пенроуз [3]. В свое время Пенроуз тоже пытался развить формально-дискретные подходы к физике пространства-времени, оперируя лишь связями между квантовыми характеристиками частиц. Важнейшей такой характеристикой, по интуитивному ощущению Пенроуза, следовало считать спин частиц, имеющий отношение как к энергии, так и к пространственной ориентации объекта. Что столь же справедливо и для описания физики гранул в вихревой губке.

Хотя аппарат спиновых сетей (математика графов, ребрам которых присвоены разные значения спина) разрабатывался Пенроузом для взаимодействующих частиц, оказалось, что после некоторых доработок его очень успешно удается углубить до описания структуры пространства на куда более мелких масштабах планковской длины. Причем не только пространства, но и пространства-времени, поскольку в рамках ПКГ удалось показать [4], что и время обладает дискретной структурой с минимальной величиной интервала 10^{-45} секунды (планковское время). Иначе говоря, эволюция вселенной происходит не непрерывно, подобно течению реки, а дискретными скачками, подобно моделированию событий в цифровом компьютере. Соответственно, появилась необходимость в новых идеях о том, каковы могут быть механизмы, реализующие в рамках ПКГ эволюцию с обеспечением причинно-следственных связей. Именно на этом этапе к разработке петлевой гравитации подключилась героиня данного раздела – греческого происхождения исследовательница Фотини Маркопулу.

-
- [1] A. Ashtekar, «New Variables for Classical and Quantum Gravity», Phys. Rev. Lett., 57(18): 2244-47 (1986). A. Ashtekar, «New Hamiltonian formulation of general relativity», Phys. Rev. D36: 1587-1602 (1987)
 - [2] Carlo Rovelli and Lee Smolin, “Knot theory and quantum gravity”, Phys. Rev. Lett., 61 (1988) 1155. Carlo Rovelli and Lee Smolin, “Loop space representation of quantum general relativity”, Nuclear Physics B331 (1990) 80-152
 - [3] Roger Penrose, «Angular momentum: an approach to combinatorial space-time» in «Quantum Theory and Beyond», ed. Ted Bastin, Cambridge University Press, 1971
 - [4] Carlo Rovelli and Lee Smolin, “Discreteness of area and volume in quantum gravity”, Nucl. Phys., B442 (1995) 593-622, [arXiv: gr-qc/9411005]

Механика нелокальности [8D]

0 Дабы полнее раскрылась суть нетривиальных работ Фотини Маркопулу (которая после вступления в брак иногда стала добавлять к своему имени еще и фамилию мужа, Каломара), понадобятся несколько вводных пояснений. Прежде всего, следует чуть подробнее обрисовать ключевые особенности того теоретического пути – петлевой квантовой гравитации (ПКГ) – по которому Маркопулу пришла на передовые рубежи большой науки. Тем более, что эти особенности обусловили и дальнейшее направление самостоятельных изысканий исследовательницы на основе уже собственных разработок.

1 Важнейшее отличие ПКГ от теории струн, как наиболее популярной на сегодня теории квантовой гравитации, это так называемая независимость от фона. Под этим техническим термином принято понимать примерно следующее. Все разновидности квантовой теории поля, включая и теорию струн, и Стандартную Модель, рассматривают взаимодействия частиц в условиях пространства, свойства которого подразумеваются неизменными и изначально известными еще из классической физики. Иначе говоря, для всех подобных теорий свойственна физическая картина с (тем или иным) заранее зафиксированным фоном.

2 Если же смотреть на картину мира с другой точки зрения – с позиций общей теории относительности – то суть ОТО можно свести к тому, что геометрию пространства никак нельзя считать фиксированной. Потому что она по самой природе своей является динамической и постоянно эволюционирует во времени. А это, соответственно, означает, что фундаментальная физическая теория, претендующая на наиболее полное объяснение окружающего мира, с необходимостью должна быть справедлива для любой из возможных геометрий пространства. Или другими словами, быть фоно-независимой. Такого рода теорией, в частности, и является петлевая квантовая гравитация.

3 Из этого факта, впрочем, совершенно не следует, что ПКГ претендует на роль «наиболее полной фундаментальной теории». Скорее даже наоборот, создатели ПКГ не раз подчеркивали, что их модель – это лишь независимая от фона теория квантовой гравитации, вовсе не претендующая на роль «теории всего». Так что даже нет оснований противопоставлять – как это нередко делают – теорию струн и петлевую гравитацию, считая их конкурирующими теориями. В лагере ПКГ считают, что при желании формализм их конструкции вполне можно было бы объединить хоть со Стандартной Моделью, хоть со струнной теорией – благо те подразумевают некий фиксированный геометрический фон, а ПКГ работает независимо от геометрии пространства.

#

4 Никто, однако, с подобными объединениями не торопится, поскольку особого смысла в этом пока не просматривается. Во-первых, петлевая квантовая гравитация страдает примерно той же самой болезнью, что и теория струн, – здесь тоже не удастся делать внятные теоретические предсказания для исхода реальных экспериментов. А значит, нет возможности практически удостовериться в правильности теории и в ее достоинствах по сравнению с другими имеющимися моделями. Другая важнейшая проблема ПКГ – отсутствие четкой связи с реальным миром. То есть у петлевых теоретиков пока что не очень получается объяснить, каким образом из конструкции ПКГ в некотором предельном случае низких энергий могли бы возникать общая относительность и плоское пространство-время.

5 В этом смысле на данный момент куда более привлекательно выглядит другая фононезависимая теория квантовой гравитации – именуемая КДТ или каузальные динамические триангуляции (см. здесь же ранее). Этот подход, разработанный Ренатой Лолл и ее более старшими коллегами, как и петлевая гравитация также оперирует гранулированной структурой пространства-времени. Однако, в отличие от ПКГ, каузальные динамические триангуляции в результате вычислительных экспериментов дают на выходе картину мира, который по многим ключевым параметрам очень похож на вселенную, наблюдаемую человеком.

6 Возможно, не случайность, что и в математику петлевой квантовой гравитации необходимый механизм каузальности, то есть формализм для установления строгих причинно-следственных связей между событиями в эволюционирующей системе, сумела встроить тоже женщина – Фотини Маркопулу. Поначалу этот аппарат, разработанный конкретно для ПКГ, получил название «каузальные спиновые сети» [1] (первая из многих совместных статей Маркопулу и Ли Смолина, опубликованная весной 1997 года). А чуть позже, начиная с 1999 года – и теперь уже в значительно более обобщенной форме для кодирования информации о состояниях системы в целом ряде теорий фононезависимой квантовой гравитации – модель Маркопулу стала именоваться «каузальные спиновые истории».[2]

7 Попутно Фотини Маркопулу удалось продемонстрировать дуализм двух достаточно разных моделей, описывающих эволюцию квантовой геометрии – механизм перетряхиваемых симплексов в КДТ и каузальные спиновые сети в ПКГ [3]. Но наряду с убедительными признаками эквивалентности, между двумя этими подходами прослеживались и существенные отличия. В частности, самоорганизация пространства в каузальных динамических триангуляциях содержит в себе весьма сильное условие, именуемое нелокальностью. Благодаря именно этому условию, эволюция гранул пространства в постоянно встряхиваемом мире не ведет к плотным комкам или беспорядочно ветвящимся полимерам, а формируется в цельный и протяженный мир с 3+1 измерениями. Нелокальность в КДТ – это когда все кирпичики пространства сонастраивают свою ось времени друг с другом, словно получая информацию о том, как это делать, не из непосредственного окружения от своих соседей, а откуда-то «извне»...

##

8 Отвлекаясь чуть в сторону от проблем КДТ-ПКГ и обращаясь к схемам Модели, сконструированной в настоящей работе, несложно увидеть, что принудительное сонастраивание в одном направлении регулярно и автоматически происходит со всеми гранулами пространства, встряхиваемого на мембране. Однако Фотини Маркопулу в своих изысканиях, естественно, оперировала совершенно иными схемами. В частности, ее размышления над тем, каким образом важный принцип нелокальности мог бы быть встроен в петлевую квантовую гравитацию, привели к довольно неожиданному открытию. Суть этого открытия уже известный авторский дуэт Маркопулу-Смолин в 2003 году опубликовал в работе под названием «Квантовая теория из квантовой гравитации».

9 В этой статье авторы решили отойти от давно сложившейся в физике традиции, согласно которой проблему объединения теории относительности и квантовой теории принято рассматривать как задачу сведения одной теории к частному или предельному случаю другой. Причем подавляющее большинство теоретиков уверено, что «более верной» является квантовая физика, поэтому классическую физику общей относительности рано или поздно ожидается вывести из квантовой теории. Значительно меньшая часть теоретиков, включающая в себя, правда, несколько знаменитых имен, считает с точностью

до наоборот. Они полагают, что на каком-то глубоком уровне реальности лежит пока еще не открытый детерминированный, т.е. «вновь классический», мир. А вот с пониманием квантовой теории, считают они, у физики не совсем все в порядке, особенно с так и не нашедшими внятного объяснения феноменами типа квантовой сцепленности, нелокальности и случайного поведения квантовых частиц.

a Фотини Маркопулу и Ли Смолин предложили посмотреть на проблему объединения нестыкующихся теорий с принципиально иной точки зрения. Теперь главный вопрос был задан примерно так. А что если сразу обе теории – как общая относительность, так и квантовая теория – являются лишь частными случаями или аппроксимациями некоторой совсем иной, пока еще неизвестной науке фундаментальной теории? Для наглядной демонстрации этой идеи авторы разработали математический механизм на основе графа состояний, конструктивно аналогичного спиновым сетям теории ПКГ. С помощью этого механизма они показали, каким образом из абстрактной фоновезависимой модели, изначально не имеющей в себе ни геометрии пространства, ни квантовой механики, может возникать квантовая теория со всеми ее характерными свойствами. И что интересно, эта квантовая физика появляется в том же самом предельном случае, в котором данная система обретает и свои пространственные свойства, характерные для известной человеку вселенной.[4]

b Для данной модели авторами изначально предполагается, что в некотором пределе она имеет классическую физику. Реализовано это так, что некоторые из узлов графа встраиваются как частицы в 3-мерное классическое пространство. То есть часть узлов соответствует позициям частиц в трехмерном пространстве, а эти частицы эволюционируют по законам ньютоновой физики в зависимости от расстояния между ними. После такого встраивания задается интересный вопрос: А что будет, если некоторые из координат этих частиц являются объектом случайных стохастических флуктуаций, например, когда их соседи по исходному графу находятся в тепловой бане? Вычисляя ответ на этот вопрос, авторы демонстрируют, что в описанном подобным образом предельном случае для встроенных частиц появляется квантовая теория. В частности, для обоих типов узлов графа – как для координат встраивания, так и исходного графа – могут быть заданы такие функции, у которых распределения вероятностей значений эволюционируют во времени согласно уравнению Шредингера. Иначе говоря, физика системы описана основным уравнением квантовой механики.

###

c Особый интерес в этой конструкции представляет реализация принципа нелокальности, непосредственно связанного с такими феноменами, как квантовая сцепленность. Как отмечают авторы, с точки зрения фундаментальных основ квантовой теории, предложенный ими механизм представляет собой «стохастическую модель со скрытой переменной». А благодаря основополагающей работе Джона Белла в физике давно установлено, что любая теория со скрытой переменной с необходимостью должна быть нелокальной. Откуда естественно вытекают очень любопытные вопросы о том, каким образом в предложенной схеме уживаются нелокальность с каузальностью? Ведь суть каузальности – это жесткие причинно-следственные связи между событиями. Нелокальность же подразумевает мгновенные взаимодействия со сверхсветовой скоростью, а значит – на первый взгляд – и нарушение каузальности?

Как показывают авторы, им удается не только разрешить этот парадокс, но и наглядно продемонстрировать, каким именно образом в их схеме возникает нелокальность, необходимая для выведения «вероятностной» квантовой теории на основе изначально детерминированной модели. Первое, что требуется для логичного объяснения феномена нелокальности – это принятие допущения, согласно которому наблюдаемое человеком пространство-время (гладкое, с размерностью $3+1$) является лишь аппроксимацией существенно иной конструкции – топологического графа, лишь часть узлов которого образует 3-мерный мир. Если такой шаг сделан, то далее уже несложно увидеть, что на самом деле в схеме реализуется не одна «локальность», а две разных идеи локальности.

Одна из них – это идея локальности в графе фундаментальной теории. Здесь два узла являются соседними, если они соединены ребром связи в графе. Другая локальность – это отдельный принцип локальности, который действует при встраивании узлов графа в условия низкоэнергетического предела. Здесь две частицы, представленные встраиванием двух узлов графа, являются соседними, если они расположены близко друг от друга в терминах метрики встраиваемого пространства. Принципиально же важным моментом является то, что в общем случае эти две идеи локальности не совпадают друг с другом.

По этой причине два узла, являющиеся соседними в графе, вовсе не обязательно оказываются соседними во встроеном пространстве. И если само это пространство – как в данной конструкции – является «эмерджентным свойством» (т.е. возникающим при особых условиях из фундаментального графа, то возникает и нелокальность. Та самая нелокальность, что требуется для выведения квантовой теории из фундаментальной неквантовой теории. Эта фундаментальная теория остается и локальной в смысле топологии графа, и детерминированной в смысле причинно-следственных связей между узлами.

-
- [1] Markopoulou, F., and L. Smolin, «Causal evolution of spin networks», Nucl.Phys. B508 (1997) 409, [arXiv: gr-qc/9702025]
 - [2] Fotini Markopoulou, «Quantum causal histories», Class. Quantum Grav. 17 (2000) 2059–2072, [arXiv: hep-th/9904009]
 - [3] Markopoulou, F., «Dual formulation of spin network evolution», [arXiv: gr-qc/9704013]
 - [4] Fotini Markopoulou, Lee Smolin. «Quantum Theory from Quantum Gravity». Phys.Rev. D70 (2004) 124029. [arXiv:gr-qc/0311059]

Эволюция без шума [8E]

Идея Маркопулу и Смолина – о том, что новую единую физику надо выстраивать не через попытки сведения несовместимых теорий друг к другу, а через их выведение из совсем другой, более фундаментальной теории – оказалась глубокой и плодотворной. Хотя и не сказать, что особо оригинальной. Достаточно вспомнить, что по весьма похожему маршруту движется ныне и теория струн с середины 1990-х. То есть с тех пор, как в основе пяти несовместимых, казалось бы, конструкций обнаружилась единая и всеобъемлющая М-теория Виттена.

Но как бы там ни было, для всех прочих теоретических направлений, разрабатывающих область фоновезависимой квантовой гравитации, подход Маркопулу оказался не просто новым, а фактически перпендикулярным ко всем прочим. Поскольку здесь в изначальной фундаментальной теории нет ни квантовых частиц, ни гравитации, ни какой-либо геометрии вообще, новое направление исследований получило название «предгеометрический фоновезависимый подход». По причине концептуальной новизны теории почти все из математического инструментария, уже наработанного в этой области ранее, оказалось непригодным.

В подобных ситуациях исследователи обычно начинают искать подходящую математику в смежных (а также любых других) областях, уповая на формальные признаки «похожести» ситуаций, на собственную интуицию или же, наконец, просто на удачу. В какой пропорции каждый из этих принципов помог конкретно в данном случае, не столь уж, наверное, и важно, коль скоро собственно цель поисков определенно была достигнута. Как было установлено при тщательном сравнении, у конструкции предгеометрической модели Маркопулу оказалось чрезвычайно много общих черт с системами обработки квантовой информации.

Если приглядеться к типичной конструкции квантового компьютера, то можно увидеть, что за скоплением вычислительных вентилях и проводов там проступает схема, очень похожая на эволюцию сетей в графе состояний из модели Маркопулу. Суть этой похожести в том, что все узлы квантового компьютера осуществляют последовательности передач информации, которые, вообще говоря, не требуется связывать с перемещениями в пространстве. Для описания обеих систем применима одна и та же математика, и что самое важное – в данной математике не содержится никаких отсылов к какому-либо фоновому пространству-времени. Иначе говоря, из модели Маркопулу следует, что на самом глубоком фундаментальном уровне вселенная представляет собой квантовый компьютер.

#

Благодаря еще одному очень удачному совпадению, примерно в то же самое время в квантовой информатике, занимающейся квантовыми вычислениями и системами исправления ошибок, произошел важный теоретико-экспериментальный прорыв. Когда Фотини Маркопулу и работающие с ней коллеги установили, что для их теории «пред-геометрии» хорошо работает аппарат квантовой теории информации, попутно выяснилось, что благодаря новейшему достижению этой области – так называемым «бесшумовым подсистемам» – для модели Маркопулу имеется замечательная кандидатура на роль частиц. Или, иначе, когерентных колебательных систем, порождающих в графе нужные свойства материи и пространства.

Идея бесшумовых подсистем, очень важная для успеха хрупких и крайне чувствительных к шумам квантовых вычислений, впервые была сформулирована в 2000 году в статье [1] трех теоретиков из Лос-Аламосской национальной лаборатории (E. Knill, R. Laflamme, L. Viola; вероятно, будет уместным особо подчеркнуть, что и в этой работе весьма заметную роль тоже сыграла женщина, итальянского происхождения исследовательница Лоренца Виола). А уже в 2001 году этим же физикам, но теперь в сотрудничестве с экспериментаторами из Массачусетского технологического института, удалось продемонстрировать и реальную работоспособность их идеи на примере модели простого квантового вычислителя.[2]

Бесшумовые подсистемы, как это ясно из их названия, обладают иммунитетом к пагубным воздействиям «шума» декогеренции, разрушающей информацию и искажающей вычисления, но из-за квантовых флуктуаций принципиально неистребимой в квантовых системах. Суть новаторского подхода заключается в том, что бесшумовые подсистемы возможны всякий раз, когда в шуме имеется или обеспечена симметрия. Новацией, впрочем, это можно назвать лишь в конкретном квантово-информационном контексте, поскольку ученым и инженерам уже давно известно, что появление симметрий в физической системе обычно подразумевает существование сохраняющихся величин, а также, соответственно, и возможность взаимно сокращать нежелательные воздействия на систему.

Именно этот принцип, можно напомнить, очень эффективно работает в резисторе на основе ленты Мебиуса, где симметричность конструкции полностью гасит все паразитные эффекты реактивного сопротивления. Теперь же исследователям удалось применить данный принцип к конструкции узлов квантового компьютера. Причем они не только продемонстрировали общую работоспособность идеи для отдельных операций, но также показали, что возможно выполнять и последовательности квантовых вычислений, не покидая защищенную от шума подсистему. Бесшумность удается гарантировать даже в тех случаях, когда ошибки продолжительно воздействуют на состояние всей системы в целом.

##

Самый интересный вопрос, конечно же, это каким боком данный результат пристегивается к предгеометрической теории квантовой гравитации. В 2005 году Фотини Маркопулу и Дэвид Крибс, специалист канадского Института квантовых вычислений, опубликовали совместную исследовательскую работу «Геометрия из квантовых частиц». В этой статье авторами было показано, что физическое поле в теории квантовой информации содержит в себе идею «когерентного возбуждения». В отличие от более общих возбуждений в теории квантового поля и в физике конденсированной материи, когерентное возбуждение теории квантовой информации не делает никаких отсылок к геометрии фона – а значит, может быть использовано в фоновезависимой системе.[3]

Когерентное возбуждение, собственно говоря, это и есть идея бесшумовой подсистемы в квантовом исправлении ошибок. С одной стороны, это подсистема, защищенная от шумовых помех благодаря симметриям этого шума. А с другой стороны – это идея о том, каким образом глобальные симметрии пространства-времени возникают из фоновезависимой теории без геометрии. Суть открытия авторов в том, можно сказать, что пассивное исправление ошибок в информатике оказалось аналогично проблемам, связанным с порождением и стабильностью устойчивых квантовых состояний в физике конденсированной материи.

Если же эти устойчивые квантовые состояния ведут себя так, как будто они находятся в пространстве-времени – значит, появляется пространство-время. Теперь, в новом контексте квантовой гравитации, роль шума выполняет просто фундаментальная эволюция системы. А существование бесшумовых подсистем, соответственно, означает когерентное возбуждение, защищенное от микроскопической планковской эволюции и сохраняющее необходимую для теории стабильность. Правда, как поясняют авторы, квантово-информационный термин «бесшумовая» в контексте эволюции может быть несколько неудачным и сбивающим с толку.

Для разделения на подсистему и окружение, вообще говоря, не обязательно иметь шум в обычном смысле этого слова. Все, что требуется – это просто эволюция динамической системы, а бесшумовая подсистема – это то, что в рамках данной эволюции сохраняет когерентность и стабильность. В более привычных терминах можно говорить, что аналогом для распространяющейся «частицы», порождающей геометрию и материю, на языке теории квантовой информации является квантовый канал. Причем идеи из области исправления ошибок в квантовых вычислениях оказываются настолько плодотворны, что могут быть использованы и для более конкретной идентификации таких объектов.

###

Удачно вписавшись в череду замечательных совпадений, осенью того же 2005 года в Австралии появляется электронная препринт-публикация [4] молодого теоретика С.О. Билсон-Томпсона. В этой статье известная физика частиц переформулируется в терминах «новой-старой» идеи, именуемой преонной моделью. Популярные в 1970-е годы, такие модели постулировали гипотетические частицы, называемые преонами, в качестве «самых фундаментальных» и образующих все прочие частицы стандартной модели. Новизна топологической модели Билсон-Томпсона заключалась в том, что у него преон – это лента, а различные виды преонов соответствуют лентам, закрученным вправо, влево или совсем никак. Три ленты могут быть сплетены вместе, и, как показал автор, различные способы сделать это точно соответствуют различным частицам стандартной модели.

Когда Ли Смолин увидел эту статью, он быстро понял, что все те переплетения лент, которые изучал Билсон-Томпсон, могут возникать в модели петлевой квантовой гравитации. Иначе говоря, различные способы сплести и запутать ребра графов при эволюции квантового пространства-времени становятся различными видами элементарных частиц. Поэтому далее Смолин отправился обсуждать данную идею к Фотини Маркопулу, задавшись вопросом, а не могут ли плетения Билсон-Томпсона оказаться другим названием для ее когерентных возбуждений. В итоге было решено пригласить австралийца к сотрудничеству, и в 2006 году появилась совместная статья трех авторов, демонстрирующая, что частицеподобные состояния в теории квантовой гравитации действительно можно описывать как косы переплетающихся лент из преонной модели.[5]

Математически строго это продемонстрировать удалось в терминах бесшумовых подсистем квантовой информатики. Особым образом выписывая уравнение состояний, авторы показали, что состояние эволюционирующего субграфа из трех лент (ребер) можно разбить декомпозицией на три фазы – две крайних незаплетенных и одну промежуточную переплетенную. При таком подходе удастся показать, что эволюция воздействует только на незаплетенные состояния, а переплетение ребер графа остается не реагирующим на обычные ходы эволюции. То есть является бесшумовой подсистемой. Следовательно, любая физическая информация, содержащаяся в косах, при эволюции системы будет распространяться когерентно.

f Получив столь любопытный теоретический результат, авторы не стали торопиться с конкретными физическими интерпретациями частиц в виде переплетающихся кос. И по какой-то причине в своей статье они совершенно не упомянули (возможно, в ту пору просто не знали) очень созвучную работу Алексея Китаева от 1997 года [6], в которой тот предложил конструкцию топологического квантового компьютера на косах – для автоматического обеспечения в системе высокой сопротивляемости к разрушению когерентности. Для целей данной книги два этих подхода особо интересны по той причине, что оба они ведут к представленной здесь Модели.

-
- [1] Knill, E., R. Laflamme, and L. Viola. «Theory of Quantum Error Correction for General Noise». *Phys. Rev. Lett.* (2000) 84: 2525
 - [2] Viola L., E. M. Fortunato, M. A. Pravia, E. Knill, R. Laflamme, and D. G. Cory. «Experimental Realization of Noiseless Subsystems for Quantum Information Processing». *Science* (2001) 293: 2059.
 - [3] David W. Kribs, Fotini Markopoulou, “Geometry from quantum particles”, 2005 preprint. [arXiv:gr-qc/0510052]
 - [4] S.O. Bilson-Thompson, «A Topological Model of Composite Preons», 2005 preprint. [arXiv:hep-ph/0503213]
 - [5] S.O. Bilson-Thompson, F. Markopoulou, and L. Smolin, «Quantum Gravity and the Standard Model», *Class.Quant.Grav.* 24:3975-3994 (2007). [arXiv: hep-th/0603022]
 - [6] Kitaev A. Yu., «Fault-tolerant quantum computation by anyons». Preprint 1997, [arXiv: quant-ph/9707021]

Время без пространства [8F]

0 Важным звеном, удачно связывающим идеи Фотини Маркопулу как с реальной физикой Стандартной модели, так и с концепцией практического квантового компьютера на основе топологических кос, оказалась еще одна новая теория под названием String-net, т.е. «струносеть». Несмотря на похожее название, эта теоретическая модель, разработанная Сяоганом Вэном из МТИ и его бывшим аспирантом Майклом Левиным, не имеет ничего общего с куда более известной теорией микроскопических суперструн. Конструкция Вэна и Левина сформировалась как осмысление новых фазовых состояний материи, открытых в 1980-е годы вместе с

1 дробным квантовым эффектом Холла (или кратко ДКЭХ).
Благодаря ДКЭХ, можно напомнить, теоретики и экспериментаторы с изумлением обнаружили, что из-за необычных свойств квантовых жидкостей в природе могут существовать такие фазовые состояния материи, которые не похожи ни на что, изучавшееся прежде. Иначе говоря, хорошо проработанная к этому времени теория фазовых переходов, считавшаяся практически исчерпывающей, оказалась не то чтобы

2 неверной, но существенно неполной. Для новых квазичастиц-энионов, объединяющих в себе несовместимые, казалось бы, свойства фермионов и бозонов, а также для связанных с ними явлений топологического порядка, определяющих новые фазовые состояния материи, явно требовалась и новая теория. Один из вариантов такого рода теории смогли предложить Вэн и Левин в 2002-2003 годах под названием струнорети.[1]
Важнейшим, наверное, достоинством струноретей представляется то, что эта модель способна не только описывать с единых позиций и новые, и уже известные фазовые состояния, но и дает существенно иной – концептуально более целостный – взгляд на происхождение и природу основных компонентов материи: фермионов и света. Заложив в основу своей теории

3 фундаментальный принцип квантовой сцепленности, связывающей частицы как бы невидимыми «струнами» в независимости от разделяющего их расстояния, Вэн и Левин занялись изучением всевозможных паттернов сцепления. Такие паттерны в общем «танце частиц», как предполагалось, своими различиями могли бы объяснить различные состояния (или фазы) материи.
В итоге ученым удалось математически сконструировать модель, в которой сцепленные частицы формируют цепочки или струны, способные свободно перемещаться «словно лапша в супе» и сплетаться друг с другом в жидкую «струнную сеть», заполняющую собой все пространство. Коллективное поведение струнорети, как показали Вэн и Левин, предоставляет

3 физическое объяснение для явления топологического порядка. При этом жидкие состояния струнных сетей способны реализовать огромное количество различных паттернов сцепленности, которые, в свою очередь, соответствуют гигантскому классу новых состояний материи. Особый же интерес представляет конденсированное состояние струноретей, дающее физику Стандартной модели.[2]

#

Исследуя математику своей теории, авторы обнаружили, что в состоянии струносетевой жидкости движение или деформации струносетей соответствуют волне, которая ведет себя согласно общеизвестному набору уравнений – Максвелловским уравнениям электромагнитного поля. Иначе говоря, из своей существенно новой конструкции ученые вывели уравнения, описывающие поведение света. По мнению Вэна, этот результат вполне можно трактовать как переткрытие наукой «квантового эфира» – но уже на более глубоком теоретическом уровне: «Через 150 лет после того, как Максвелл записал эти уравнения, эфир – среда которая их порождает – была наконец обнаружена». [3]

Согласно новой струносетевой картине, развитой в этом направлении, свет и другие калибровочные бозоны стали выглядеть как вибрации конденсированных струносетей. А, соответственно, фермионы, представляющие собой концы таких струн, оказываются источниками электрического и других калибровочных полей. Как показали исследователи, такая трактовка струнных концов может воспроизводить статистику Ферми и уравнение Дирака, описывающее движение электронов. Более того, теория струносетей позволила единым и более естественным образом объяснить происхождение прочих элементарных частиц, таких как кварки, образующие протоны и нейтроны, а также частиц, отвечающих за остальные фундаментальные силы Стандартной модели, вроде глюонов, W и Z бозонов.

Таким образом, выстроенная Вэном и Левиным картина струносетевой конденсации не только предоставила единый механизм происхождения света и фермионов, но и показала, что здесь элементарные частицы не являются фундаментальными строительными блоками материи. В струносетевой жидкости частицы возникают как дефекты топологии или, выражаясь более образно, как «водовороты» в более глубоко организованной структуре пространства-времени. Ну а попутно с этим новым-старым взглядом на природу пространства и квантового эфира также обнаружилось, что имеется отчетливо много зон соприкосновения между идеями струносетевой конденсации и теорией петлевой квантовой гравитации.

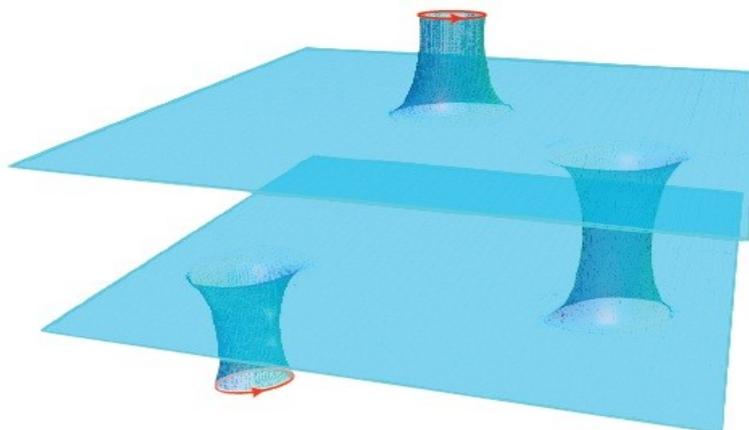
Сходство двух моделей вполне очевидно даже с формальной точки зрения: если в струносетевом конденсате пометить струны положительными целыми числами, то по сути дела получаются спиновые сети, изучаемые в петлевой квантовой гравитации. Первыми, похоже, отметили этот факт сами Левин и Вэн, а начиная примерно с 2006 года уже в рамках ПКГ появилось целое самостоятельное направление, возникшее при непосредственном участии Фотини Маркопулу и органично встраивающее механизмы струносетей в теорию петлевой квантовой гравитации. Данное направление получило собственное название «квантовая графотация» (Quantum Graphity), а разрабатывающие его теоретики в итоге надеются показать, что благодаря концепции струносетевой конденсации в рамках ПКГ удастся полностью вывести стандартную модель физики частиц.[4]

##

Одной (и конечно далеко не единственной) из проблем, затрудняющих быстрое продвижение к столь амбициозной цели, оказывается тот факт, что и в рамках струносетей удалось вывести не все известные свойства физики частиц. В частности, имеющийся механизм струносетевой конденсации никак не объясняет наблюдаемую в природе киральную асимметрию, т.е. тонкие различия во взаимодействиях право- и левозакрученных фермионов. Со стороны ПКГ в этом отношении заметной помощи, судя по всему, получить не удастся. Однако на другом исследовательском направлении, в 1990-е годы начатом Алексеем Китаевым и безусловно близком как теории Вэна-Левина, так и изысканиям Маркопулу, ныне получены перспективные результаты, сулящие прогресс и в двух смежных областях.

Еще в работе 1997 года [5], посвященной стойким к ошибкам топологическим квантовым вычислениям, Китаевым был введен специфический «ленточный» оператор, порождавший нужное ему двухчастичное состояние – пару удаленных друг от друга частиц, связанных струной. Это свое изобретение автор пояснил довольно своеобразно: «Не знаю, каким образом такие операторы выводятся; поэтому просто дам готовый ответ и объясню, почему он правильный». Именно такой оператор впоследствии использовали Вэн и Левин для построения своей модели струносетей, в которой сцепленные струной фермионы порождаются исключительно парами. А на удачном 2D-примере из работы Китаева они продемонстрировали точную аналитическую разрешимость своей конструкции.

Недавно же, в 2009 году, Алексей Китаев и группа его коллег (Gils, Trebst, Ludwig, Troyer, Wang) опубликовали работу, по духу очень близкую идеям Вольфганга Паули о «раздвоении или двуделении», сопровождающемся уменьшением симметрии. Исследователи занимались изучением особенностей такого рода непрерывного фазового перехода в энионных квантовых жидкостях, который направляется квантовыми флуктуациями топологии. Было обнаружено, что особо интересную и богатую физику демонстрирует критическое состояние, соединяющее вихревыми трубками два отдельных листа энионной жидкости и способное порождать поверхности с существенно разными топологиями и с флуктуациями на всех масштабах длин. На основе этих результатов авторы выстроили интуитивную физическую картину данной модели, которая объединяет струносетей Вэна-Левина и «петлевой газ» Китаева, предоставляя простое описание топологических квантовых фаз и их фазовых переходов.[6]



Вихревые возбуждения-трубки в слоях энионной квантовой жидкости

В контексте «раздвоения или двуделения» уместно вспомнить и еще об одной теоретической работе 1990-х годов. Разрабатывая направление фоновонезависимых подходов к квантовой гравитации, Луис Крэйн предположил, что правильный способ применения квантовой теории ко вселенной – не пытаться вставить всю вселенную в одну квантовую систему. Вместо этого Крэйн предположил, что квантовая механика является не статическим описанием одной системы, а записью информации, которую одна подсистема вселенной может иметь возле другой подсистемы – посредством их взаимодействия. После чего было предположено, что для каждого способа разделения вселенной на две части имеется свое квантово-механическое описание, и показано, что квантовые состояния такой системы живут не в одной ее части или в другой, а на границе между ними.[7]

###

На основе этого новаторского и радикального предположения, выдвинутого Л. Крэйном, другим теоретикам в последующие годы удалось разработать целый класс подходов к квантовой теории, совокупно получивших название относительные квантовые теории. Такое название отражает лежащую в основе этих теорий идею о том, что квантовая механика является описанием взаимоотношений между подсистемами вселенной.

Интересно, что в контексте петлевой квантовой гравитации гипотеза Крэйна привела к появлению нового подхода к квантовой космологии, в конце 1990-х годов созданного Фотини Маркопулу и ее коллегами. Маркопулу обнаружила, что описание обмена информацией между различными подсистемами можно эквивалентно рассматривать как описание причинно-следственной структуры, которая ограничивает, какие системы могут влиять друг на друга. По сути дела, таким образом ей удалось установить, что вселенная может описываться как квантовый компьютер с динамически генерируемой логикой.

Еще десять лет спустя Фотини Маркопулу сумела довести, можно сказать, идею «о вселенной как компьютере» до своего полного логического завершения. В 2009 году она опубликовала эссе под весьма эффектным названием типа «Пространство не существует, так что может быть лишь время». Такой формулировкой своей позиции Маркопулу, можно сказать, вывернула наизнанку достаточно популярную среди теоретиков идею, согласно которой в общей теории относительности, по большому счету, имеется лишь пространство, а времени не существует.

Маркопулу же в своем эссе показывает, что проблема кажущегося исчезновения времени в уравнениях ОТО – это парадокс, возникший, как оно обычно бывает с парадоксами, из несформулированной ложной предпосылки. Конкретно в данном случае ложным предположением оказывается то, что пространство реально существует. А Фотини, неявно подразумевая, вероятно, компьютерную идею виртуальной реальности, предлагает считать, что в некоем фундаментальном смысле несуществующим является не время, а именно пространство с его неотъемлемыми атрибутами типа геометрии и гравитации. После этого во вселенной-компьютере остается лишь фундаментальное время – или тактовая частота и память. Причем имеется сильное ощущение, что на этой основе вполне возможно построить новую физику.[8]

-
- [1] M. Levin, Xiao-Gang Wen, "Fermions, strings, and gauge fields in lattice spin models," Phys.Rev. B 67, 245316 (2003) [arXiv:cond-mat/0302460].
 - [2] M. Levin, Xiao-Gang Wen, "String-net condensation: A physical mechanism for topological phases," Phys. Rev. B 71, 045110 (2005) [arXiv:cond-mat/0404617]. M. Levin, Xiao-Gang Wen. «Photons and electrons as emergent phenomena». Rev. Mod. Phys. 77, 871-879 (2005). [arXiv:cond-mat/0407140]
 - [3] M. Levin, Xiao-Gang Wen, "Quantum ether: Photons and electrons from a rotor model," Phys.Rev.B73:035122 (2006) [arXiv:hep-th/0507118].
 - [4] Tomasz Konopka, Fotini Markopoulou, Lee Smolin. «Quantum Graphity». Preprint 2006. [arXiv:hep-th/0611197]
 - [5] A.Yu. Kitaev, «Fault-tolerant quantum computation by anyons», Annals Phys. 303 (2003) 2-30, [arXiv:quant-ph/9707021].
 - [6] Charlotte Gils, Simon Trebst, Alexei Kitaev, Andreas W. W. Ludwig, Matthias Troyer, Zhenghan Wang. «Topology driven quantum phase transitions in time-reversal invariant anyonic quantum liquids», Nature Physics 5, 834 (2009). arXiv:0906.1579 [cond-mat.str-el]
 - [7] L. Crane, «Clock and Category: Is Quantum Gravity Algebraic?». J. Math. Phys., 36: 6180-193 (1995). [arXiv:gr-qc/9504038]
 - [8] Fotini Markopoulou, «Space does not exist, so time can». arXiv:0909.1861v1 [gr-qc] 10 Sep 2009