

МЕМУАР МАЛЛАНСОНА

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ: СУПЕРСИММЕТРИЯ

"...Его встретили насмешками и недоверием; все ведущие ученые наотрез отказались даже обсуждать его изобретение... ..настойчивость Купера привела к тому, что его поместили в психиатрическую больницу, откуда он бежал, чуть было не потеряв свой генератор, ...его спас и приютил владелец придорожного кафе... Куперу удалось уговорить профессора Цимбалиста на проведение одного-единственного эксперимента, в котором белая мышь перемещалась взад и вперед во Времени..."

Айзек Азимов. "Конец Вечности".

В 1918 году, вскоре после создания Эйнштейном общей теории относительности, Вейль предложил интересное дополнение к его теории. Согласно Эйнштейну, кривизна пространства-времени нашей Вселенной ¹ непостоянна – она изменяется по мере приближения к тяготеющим небесным телам. Согласно же Вейлю, непостоянна не только кривизна, но и масштабы пространства-времени ² – они могут изменяться по мере движения из одной точки пространства в другую. Искривление пространства-времени в теории Эйнштейна отождествляется с гравитационным полем; аналогичным образом изменение масштабов пространства-времени в теории Вейля отождествлялось с электромагнитным полем. То есть электромагнитное поле в его теории являлось геометрическим партнером гравитационного поля. В дальнейшем теории такого типа получили название *Единых теорий поля*.

Специфика геометрии общей теории относительности состоит в том, что в ней направление вектора в криволинейном пространстве-времени после обегания им замкнутой кривой может не совпадать с исходным. Математически это изменение обеспечивает так называемый *тензор кривизны*, физически – гравитационное поле. Тензор кривизны действует на компоненты *метрического тензора* ³ и таким образом устанавливает зависимость процесса измерения физических величин от кривизны окружающего пространства-времени.

В свою очередь, специфика геометрии Единой теории поля Вейля состояла в том, что в ней, помимо изменения направления вектора после обегания им замкнутой кривой, могла изменяться еще и его длина. Математически это изменение обеспечивал так называемый *метрический вектор*, физически – электромагнитное поле. Метрический вектор действовал на компоненты того же метрического тензора. В теории Эйнштейна этот тензор один и тот же во всех точках пространства-времени, а в теории Вейля он изменялся от точки к точке под действием электромагнитного поля. Такое изменение получило название *калибровочного* или, по-другому, *масштабного преобразования*.

Теория Вейля интересна во многих отношениях, и прежде всего единым описанием гравитационного и электромагнитного полей. Тем не менее, от нее пришлось отказаться,

¹ То есть направление в нем линий кратчайшего расстояния.

² То есть длины находящихся в нем линеек и скорости хода часов.

³ Этот тензор устанавливает единую длину и единую скорость хода часов во всех точках пространства-времени. Его можно рассматривать как четырехмерные оси координат, одни и те же для всех процессов измерения во Вселенной.

поскольку она противоречила физическому опыту. Как показал Эйнштейн, длины линеек и показания часов в этой теории зависели от своего прошлого состояния. Кроме того, в ней показания часов зависели от своего пространственного расположения, независимо от наличия или отсутствия гравитационного поля. Причиной этого являлась прямая связь метрического вектора с метрическим тензором.

Пытаясь устранить этот недостаток, Вейль предположил, что изменение метрического тензора от точки к точке под действием электромагнитного поля не имеет никакого отношения к реальному поведению линеек и часов. В такой форме теория Вейля не противоречила опыту, но была лишена внутренней убедительности. В самом деле, зачем приписывать электромагнитному полю ненаблюдаемые свойства, если все наблюдаемые его свойства прекрасно описываются электродинамикой Максвелла? Только для того, чтобы объединить гравитацию с электромагнетизмом?

Новый интерес к теории Вейля возник после того, как Шредингер предложил свое уравнение для волновой функции электрона. При этом оказалось, что данное уравнение допускает такую группу преобразований, которая аналогична группе калибровочных преобразований в теории Вейля. Наиболее явно эта аналогия проявляется в законе сохранения электрического заряда, который в обеих группах выводится одинаково. И это не случайно, поскольку калибровочная группа теории Вейля переходит в эту новую группу после замены в ней метрического тензора волновой функцией электрона, а метрического вектора – соответствующим оператором.

Первым внимание на этот факт обратил сам Вейль. Но он не ограничился его констатацией, а развил его в фундаментальный *принцип локальной калибровочной инвариантности*. В 1929 году он показал, что в теории, обладающей этой инвариантностью, электромагнитное поле возникает автоматически. К примеру, можно представить себе ситуацию, что сначала был открыт электрон, построены специальная теория относительности и квантовая механика. Тогда, согласно Вейлю, существование электромагнитного поля и уравнения электродинамики Максвелла можно было бы открыть чисто теоретически, исходя из одного лишь требования локальной калибровочной инвариантности волновой функции электрона.⁵ Эта работа Вейля практически без изменений вошла в современную квантовую теорию поля. Именно поэтому преобразование волновых функций электронов, оставляющее их свойства без изменения, называется сегодня калибровочным, хотя совершенно ясно, что ни о каком преобразовании масштабов в данном случае речь не идет.

Следующей после Вейля оказалась Единая теория поля Калуцы-Клейна. В 1921 году Калуца применил идеи общей теории относительности Эйнштейна к расширенному пятимерному миру. В результате он получил комбинированную систему уравнений Эйнштейна и Максвелла.⁶ Но чтобы кроме этих двух систем уравнений не получалось больше никаких других, Калуца ввел в свою теорию искусственное предположение о независимости физических законов Вселенной от пятого измерения. Это обстоятельство

⁵ Именно принцип локальной калибровочной инвариантности имели в виду Ааронов и Бом, когда предлагали свой опыт, демонстрирующий парадоксальность законов квантовой механики (см. 2-ю часть).

⁶ Калуца ввел пятое измерение пространства-времени для того, чтобы увеличить число компонентов метрического тензора в общей теории относительности (хотя другого смысла, кроме формального объединения гравитации с электромагнетизмом, в этом не было), а потом связал дополнительные компоненты с электромагнитным полем.

делало его теорию формальной и непривлекательной. В 1926 году Клейн объединил идею Калуцы с некоторыми идеями квантовой механики. Он предположил, что пятое измерение свернуто, имеет планковские размеры. Это приводило к тому же результату, что и в теории Калуцы,⁷ но не лишало пятое измерение физического смысла. Проблема в том, что при этом в теории возникало дополнительное скалярное поле, связанное с пятым измерением,⁸ физический смысл которого так и не удалось прояснить.⁹ Кроме того, Клейн надеялся, что такая поправка к теории Калуцы позволит ввести в нее квантование полей,¹⁰ но его надежды не оправдались.

В 1925 году свою первую Единую теорию поля предложил Эйнштейн. В теории Калуцы-Клейна число компонентов метрического тензора в общей теории относительности было увеличено за счет добавления пятого измерения к уже имеющимся четырем измерениям пространства-времени. В теории Эйнштейна то же самое было достигнуто за счет усложнения группы преобразований пространственно-временных координат. При этом симметричный метрический тензор общей теории относительности заменялся на несимметричный, состоящий из двух частей – симметричной и антисимметричной. Симметричную часть Эйнштейн отождествил с гравитационным полем, а антисимметричную часть – с электромагнитным полем. Такое отождествление представлялось вполне естественным, поскольку электромагнитный тензор Максвелла¹¹ является антисимметричным тензором.

Но вскоре после публикации статьи с этой теорией Эйнштейн от нее отказался, поскольку не смог вывести из нее уравнения электродинамики Максвелла. Ближе всего он подошел к первой системе уравнений Максвелла,¹² а к выведению второй системы¹³ так и не приступил. Симметричная часть метрического тензора в его теории действительно приводила к уравнениям гравитационного поля, но антисимметричная часть не приводила к уравнениям электромагнитного поля. Паули по этому поводу сказал, что в теории Эйнштейна полностью отсутствует физический принцип, подобный принципу эквивалентности в общей теории относительности, основанному на опытных данных. Не могут уравнения поля, основанные на формальных приемах, лишенных непосредственного физического смысла, иметь какое-либо отношение к физике.

Эта работа Эйнштейна имела неожиданное продолжение. Дело в том, что еще в 1922 году Картан показал, как в общей теории относительности можно определить тензор энергии-импульса в каждой точке пространства-времени: для этого нужно задать в ней, помимо

⁷ То есть к удалению из теории лишних систем уравнений.

⁸ Напоминаю, что электромагнитное поле является векторным.

⁹ Предполагалось, что это поле является полем волны Шредингера, т.е. полем волновой функции частиц. Но дальнейшее изучение этого вопроса привело к более общей и главной нерешенной проблеме нашего времени – проблеме объединения общей теории относительности с квантовой механикой.

¹⁰ Так как описание пятимерного мира с помощью четырехмерного математического аппарата является неполным, представлялось возможным из неопределенности четырехмерного описания получить принцип неопределенностей Гейзенберга. При этом квантовые явления получили бы объяснение в рамках классической теории поля.

¹¹ Этот тензор добавляется к тензору энергии-импульса общей теории относительности при описании движения электрически заряженных тел в гравитационных полях.

¹² Для ротора электрического и магнитного полей. Эти уравнения описывают переменные электрические и магнитные поля.

¹³ Для дивергенции электрического и магнитного полей. Эти уравнения описывают статические поля электрических и магнитных зарядов.

параллельного переноса вектора, еще и его поворот, т.е. кручение. Согласно Картану, все таким образом определенные векторы находятся в равновесии, что соответствует среде с постоянным давлением и постоянным крутящим моментом. После статьи Эйнштейна стало ясно, что антисимметричные коэффициенты связности в его теории эквивалентны коэффициентам кручения Картана. Сегодня эта модель называется *теорией Эйнштейна-Картана*. В дальнейшем она развивалась в направлении перехода от кручения к спину. Сам Эйнштейн никогда не занимался этой теорией, поскольку она не имела непосредственного отношения к Единым теориям поля.

Еще один вариант Единой теории поля Эйнштейн предложил в 1928 году. В предыдущем варианте он увеличил количество компонентов метрического тензора за счет усложнения группы преобразований пространственно-временных координат. При этом новая группа преобразований не получила конкретного физического или геометрического смысла, осталась скрытой за формальными манипуляциями с метрическим тензором. В новом варианте эта группа получила конкретный геометрический смысл. Дело в том, что в римановом пространстве общей теории относительности можно сравнивать длины отрезков, но нельзя сравнивать их направления, в том числе их параллельность или непараллельность. Идея Эйнштейна состояла в том, чтобы ввести в римановом пространстве, помимо отношений длины, еще и отношения параллельности линий.¹⁴ При этом геометрия пространства в его теории оказалась промежуточной (по своей общности) между римановой и евклидовой геометриями.¹⁵

В данном варианте Эйнштейну удалось получить всю систему уравнений Максвелла, но у него возникли трудности с геометрической интерпретацией электромагнитного поля.¹⁶ Кроме того, ему удалось получить сферическое несингулярное решение уравнений поля, соответствующее электрически заряженному шару с ненулевой массой покоя, но не удалось получить закон взаимодействия таких тел. Более того, гравитационное поле в его теории оказалось не эйнштейновским, а ньютоновским!¹⁸ В течение четырех лет Эйнштейн продолжал работать над этим вариантом, а потом отказался и от него. Попытки Эйнштейна геометрически описать электромагнетизм путем изменения римановой геометрии были признаны несовместимыми с хорошо проверенным законом силы Лоренца и отвергнуты. Сегодня считается, что частицы и поля, отличные от гравитации, должны добавляться к геометрии, а не выводиться из нее.

Прежде чем продолжить, хочу привести еще один интересный факт. В 1925 году Райнич опубликовал статью, из которой следовало, что при некоторых допущениях электромагнитное поле полностью определяется кривизной пространства-времени, поэтому нет никакой необходимости в дальнейшем обобщении общей теории относительности. А именно, при определенных условиях¹⁹ тензор кривизны в этой теории описывает электродинамику Максвелла в пустом пространстве. При этом уравнения

¹⁴ Поэтому данный вариант Единой теории поля получил название *теории абсолютного параллелизма*.

¹⁵ Отличие этой геометрии от геометрии Евклида состоит в том, что в ней две пары параллельных линий, лежащих в одной поверхности, могут не пересекаться друг с другом, даже если эти пары не параллельны. С другой стороны, отличие этой геометрии от геометрии Римана состоит в том, что в ней прямые линии (т.е. линии постоянного направления) не совпадают с геодезическими линиями (т.е. линиями кратчайшего расстояния между точками).

¹⁶ Пришлось вводить для него другой антисимметричный тензор.

¹⁸ Когда Паули узнал об этом, то воскликнул: "А что нам теперь делать с прелессией орбиты Меркурия?"

¹⁹ Сегодня их называют *полевыми условиями Райнича*.

Максвелла тривиальным образом связывают кривизну пространства-времени со скоростью ее изменения.

В то время на эту статью никто не обратил внимания. А между тем, из нее следовало, что все варианты Единой теории поля, подобные тем, которые я привел, лишь в той мере давали удовлетворительные результаты, в какой выполняли условия Райнича, и наоборот, в той мере усложняли получение этих результатов, в какой изменяли исходную форму общей теории относительности. А таких вариантов было гораздо больше, чем я привел.²⁰ Но поскольку они отличались от вариантов Вейля и Калуцы лишь формальными деталями, то я не стал их рассматривать.

В 1955 году к тому же выводу, что и Райнич, независимо пришел Мизнер. Вместе с Уилером он развил этот вывод в так называемую *геометродинамику*,²¹ смысл которой сводился к тому, что электромагнитное поле существует во Вселенной наряду с гравитационным полем, как разные геометрические свойства пространства-времени. Эти свойства существуют и без источников обоих видов полей, в виде пустого плоского пространства-времени, в котором массивные тела и электрические заряды отсутствуют. А то, что мы принимаем за источники этих полей, формирует топология пространства-времени, захватывающая и удерживающая эти поля в устойчивом состоянии.²³ В геометродинамике Мизнера-Уилера масса имела чисто электромагнитную природу, а частицы интерпретировались как *геоны*, т.е. сферические сгустки гравитационного поля, локализирующие и удерживающие такую электромагнитную массу. Электрически (или гравитационно) заряженные частицы имели более сложную топологию, например, топологию *ручек*.²⁴

В своей теории Мизнеру и Уилеру удалось получить даже квантовые эффекты, но уже ценой отхода от классической теории поля. Дело в том, что движение квантовой частицы в пространстве можно представить в виде локализованного пакета волн разной длины. При совпадении фаз этих волн происходит интерференция, и их суммарная амплитуда растет. Этот рост происходит только до определенного предела, после чего пакет разрушается. Но тут же (а точнее, уже в процессе существования первого пакета) начинает формироваться новый пакет при совпадении фаз новых волн. Этот факт полностью

²⁰ Я не привел здесь другие варианты теории Вейля, в том числе эйнштейновский вариант. Не привел проективные варианты Единой теории поля, равносильные теории Калуцы, в том числе эйнштейновские варианты, которых было несколько. Этими теориями занимались, помимо Вейля, Калуцы, Клейна и Эйнштейна, также Паули, Эддингтон, Шредингер, Бергман, Веблен, не говоря уже о тех, кто работал над ними вместе с Эйнштейном...

²¹ Или, как они сами "скромно" называли ее, *исконно Единую теорию поля*.

²³ О возможность расширения геометрии Римана на топологию еще до общей теории относительности говорили сам Риман и Клиффорд. После создания общей теории относительности этот вопрос изучали Клейн, Арновитт, Штерн и Мизнер.

²⁴ Для наглядности рассмотрим такую ручку (она имеет форму обрезка трубы), пристыкованную двумя своими концами к поверхности, в которой имеются два соответствующих отверстия. Силовые линии поля проходят через ручку и выходят на поверхность, расходясь во все стороны. Внутри ручки плотность силовых линий поля на единицу площади постоянна (что соответствует постоянству величины заряда, создающего это поле), а на поверхности она уменьшается по мере удаления от концов ручки. Концы ручки могут находиться на любом расстоянии друг от друга, в том числе на недостижимом (например, если ручка соединяет две несвязанные друг с другом поверхности). Это и есть двухмерная топологическая модель электрического и гравитационного зарядов. Аналогичным образом строились заряды любых размерностей. Как утверждали Мизнер и Уилер, если ручка достаточно мала (в их теории она имела планковские размеры, т.е. порядка 10^{-33} см), то ни один наблюдатель не обнаружит отличия одного ее конца от реального заряда.

исключает описание движения волнового пакета в пространстве как движения материальной частицы по непрерывной траектории, а значит и классический полевой подход к этой проблеме. Такое движение можно описывать только в рамках квантовой теории поля. Или в рамках теории солитонов. Но теория солитонов не объясняет происхождение квантовых чисел и других квантовых свойств элементарных частиц, поэтому проблема все равно остается.

Мизнер и Уилер хорошо понимали это, поэтому не стали развивать эту идею дальше. Вместо нее они ввели в свою теорию идею *предгеометрии* как особой формы геометродинамики на расстояниях, сравнимых с планковскими размерами.²⁶ В пространстве предгеометрии происходят квантовые флуктуации топологии – в нем топологические ручки мелькают на одно неуловимое мгновение вместе с обломками метрики, а обычные элементарные частицы возникают в виде возбужденных состояний подобного (полугеометрического и полуфизического) поля. Как сказал по этому поводу Уилер – не геометрия и только потом квантовый принцип, а наоборот, сначала квантовый принцип и только потом геометрия! В конце концов авторы сами признались, что реальные частицы, реальные массы и реальные заряды в их теории полностью исключаются из рассмотрения и относятся к области квантовой физики.

На этом закончился первый этап поиска Единой теории поля, в котором исследователи исходили из принципов классической теории поля. К этому времени квантовая теория поля уже отводила свое место под солнцем, и большинство исследователей в поисках единой теории исходили уже из ее принципов. Первой из таких теорией стала перенормируемая теория электрослабого взаимодействия. Но сначала рассмотрим теорию слабого взаимодействия.

С 1896 года, после открытия Беккерелем явления радиоактивности, началось его активное изучение, приведшее к открытию элементарных частиц. Большинство этих частиц (прежде всего тяжелых) оказались нестабильными, а в их распадах обнаружилась одна странность – в них не сохранялись свойства частиц, которые сохранялись в электромагнитном и ядерном взаимодействиях. Было высказано предположение, что эти распады определяются другим, неизвестным до сих пор взаимодействием, которое может менять свойства частиц. Его назвали *слабым взаимодействием*, поскольку действующие в нем силы гораздо слабее электромагнитных и ядерных сил. Теорию этого взаимодействия в 1934 году предложил Ферми. Она предполагает, что слабое взаимодействие является контактным, т.е. происходит в одной пространственной точке. Классическим примером этого взаимодействия является распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино.

Однако теория Ферми не объясняла само несохранение свойств частиц в слабых распадах. Поэтому в 1953 году Фейнман и Гелл-Манн предложили так называемую *V-A-теорию* слабого взаимодействия, учитывающую этот факт. Она исходила из той же контактной схемы, что и теория Ферми. V-A-теория верно предсказывала результаты экспериментов, но только при малых энергиях распадающихся частиц, при больших энергиях она давала неверные предсказания. Кроме того она содержала много произвольных параметров.²⁷

²⁶ Об "особости" этой геометрии говорит одно уже то, что пространство ее является *нехаусдорфовым*. Нехаусдорфовы пространства не подчиняются 2-й аксиоме отделимости (*аксиоме Хаусдорфа*) в топологии. Чтобы не залезать в дебри, скажу только, что все топологические пространства, которые имеют сегодня хоть какой-то практический (даже только математический!) интерес, являются хаусдорфовыми.

²⁷ То есть многие характеристики слабого взаимодействия извлекались прямо из эксперимента.

Более того, оказалось, что V-A-теория, как и квантовая электродинамика, является противоречивой, но, в отличие от квантовой электродинамики, не перенормируемой теорией. Причиной этого был контактный характер слабого взаимодействия. Причем обменные схемы слабого взаимодействия, в которых распадающиеся частицы обменивались массивными квантами,²⁸ к тому времени уже были разработаны, но не находили широкого применения. Этому мешали два факта – то, что при малых энергиях частиц V-A-теория прекрасно описывала их распады, и то, что теория с обменными квантами также была не перенормируемой теорией.

Разрешить все проблемы в описании слабых распадов частиц удалось Вайнбергу, Глэшоу и Саламу, предложившим в 1967 году *теорию электрослабого взаимодействия*, объединяющую на общей основе электромагнитное и слабое взаимодействия. В этой теории безмассовый фотон, обеспечивающий электромагнитное взаимодействие между лептонами и адронами, оказывается тесно связанным с массивными промежуточными бозонами, обеспечивающими слабое взаимодействие между этими же частицами. Получить такую связь удалось с помощью математического приема, открытого Хиггсом в 1964 году и названного в его честь *механизмом Хиггса*.²⁹ Этот прием состоит из двух операций – локализации преобразований симметрии, лежащей в основе данной теории, и спонтанного нарушения этой симметрии. Обе операции были известны уже давно и существовали в виде самостоятельных приемов. Их особенностью было то, что в качестве следствий они давали дополнительные поля и частицы, которые не всегда были удобны. Механизм Хиггса разрешил и эту проблему.

О локализации калибровочных преобразований я говорил в двух предыдущих частях, но здесь хочу сделать это более подробно. Так, во второй части я говорил, что в классической электродинамике векторные потенциалы электромагнитного поля не имеют физического смысла, такой смысл придается только разности этих потенциалов, которую можно измерить в эксперименте. Сами же по себе эти потенциалы могут быть какими угодно. В этом смысле векторные потенциалы электромагнитного поля являются такими же эфемерными величинами, как и волновые функции электронов, у которых в эксперименте можно измерять только квадраты модуля.³⁰

В квантовой электродинамике векторным потенциалам электромагнитного поля придается более конкретный смысл. Они обеспечивают существование в вакууме виртуальных полей, связанных друг с другом и с реальными электромагнитным полем абсолютными значениями своих векторных потенциалов. Причем значения этих потенциалов могут изменяться как угодно, квантовая электродинамика требует сохранения только разности этих значений – той, которая соответствует напряженности реального электромагнитного поля. Все остальные поля остаются в вакууме, поскольку напряженность их не превышает величины постоянной Планка. Подобное изменение значений векторных потенциалов называется *калибровочным преобразованием*, а сохранение свойств реального электромагнитного поля, не зависящее от изменения его векторных потенциалов, – *калибровочной инвариантностью векторных потенциалов электромагнитного поля*.

²⁸ Так называемыми *промежуточными бозонами* W^\pm и Z^0 .

²⁹ Необходимо сказать, что Хиггс не является единственным автором этого открытия. Практически одновременно с ним "механизм Хиггса" открыли Браут, Энглерт, Гуральник, Хейген и Киббл. Но все лавры достались Хиггсу, поскольку он сформулировал его в наиболее полном виде.

³⁰ Что соответствует (амплитуде) вероятности обнаружения электрона в данной точке пространства.

Калибровочные преобразования в квантовой электродинамике применяют не только к векторным потенциалам электромагнитного поля, но и к волновым функциям электронов. При этом все реально наблюдаемые свойства электронов сохраняются. Эта инвариантность волновых функций электронов относительно калибровочных преобразований обеспечивает сохранение у них электрического заряда, а также сложную структуру физического вакуума, в котором, помимо виртуальных полей, существуют еще и виртуальные электроны, связанные друг с другом и с реальными электронами абсолютными значениями фаз своих волновых функций.

Более того, если сохранение свойств электронов рассматривать не глобально, а локально, то существование электромагнитного поля становится просто необходимым. Глобальное сохранение свойств электронов предполагает взаимосвязанное изменение их волновых функций во всем пространстве-времени. Но если рассматривать эти свойства локально, т.е. независимо изменять волновые функции электронов в разных точках пространства-времени, то сохранение причинно-следственных взаимоотношений между ними можно обеспечить только с помощью такого же локального изменения состояния электромагнитного поля. Это и есть смысл принципа локальной калибровочной инвариантности, который Вейль вывел из своей Единой теории поля.

Так вот, фотоны, как кванты локального калибровочного электромагнитного поля,³¹ возникают в этой процедуре в единственном экземпляре только в одном случае – если мы ограничиваем количество исходных частиц одними лишь электронами.³² Если же мы добавляем к ним другие электромагнитно взаимодействующие частицы, например, протоны, то вместе с фотоном возникает еще один квант локального калибровочного поля. И это второе поле уже не является электромагнитным, поскольку протоны, помимо электромагнитного, участвуют еще и в сильном взаимодействии. Именно поэтому до теории электрослабого взаимодействия калибровочные преобразования применялись к электронам и протонам только раздельно.³⁴

Что касается механизма спонтанного нарушения симметрии, то впервые он был обнаружен в физике твердых тел при изучении их фазовых переходов. Наиболее известным примером этого механизма является спонтанное намагничивание ферромагнетика при снижении его температуры ниже так называемой *точки Кюри*.³⁵ Выше этой температуры спины атомов ферромагнетика ориентируются хаотически, т.е. обладают симметрией относительно вращений в пространстве, а ниже этой температуры ориентация спинов фиксируется в одном направлении, и симметрия нарушается. А поскольку выделенное направление ориентации спинов в ферромагнетике произвольно, то поворот системы спинов как целого не изменяет ее энергию. Периодическое повторение таких поворотов формирует спиновые волны, квантами которых являются *магноны* – безмассовые безспиновые квазичастицы.

³¹ То есть *безмассовые векторные (они же калибровочные) бозоны*.

³² И позитронами, поскольку в электромагнитном взаимодействии они ничем не отличаются от электронов.

³⁴ Помимо электромагнитного, протоны и электроны участвуют еще и в слабом взаимодействии. Поэтому при построении калибровочных теорий электромагнитного взаимодействия электронов и сильного взаимодействия протонов приходится игнорировать еще и этот факт. А при построении сильного взаимодействия протонов и нейтронов приходится игнорировать факт участия протонов в электромагнитном взаимодействии.

³⁵ Точка Кюри – это температура, выше (ниже) которой ферромагнетик самопроизвольно размагничивается (намагничивается). Для каждого ферромагнетика эта температура своя.

Аналогичный пример спонтанного нарушения симметрии дают сверхпроводники. Во второй части я говорил, что сверхпроводниками второго рода называются такие сверхпроводники, которые имеют достаточно протяженный температурный интервал перехода в сверхпроводящее состояние. В пределах этого интервала магнитное поле может проникать внутрь сверхпроводника. Как только сверхпроводник полностью переходит в сверхпроводящее состояние, магнитное поле выталкивается из него. Это явление получило название *эффекта Мейснера* (по имени ученого, открывшего его в 1933 году). У сверхпроводников первого рода этот интервал настолько мал, что магнитное поле сразу же выталкивается из них. То есть это не интервал, а критическая температурная точка, равносильная точке Кюри у ферромагнетиков.

Для простоты возьмем сверхпроводник первого рода. Переход его через критическую точку в сверхпроводящее состояние можно рассматривать как образование в нем конденсата – сверхпроводящей фазы электронов. В этой фазе электроны с противоположными импульсами и спинами объединены в так называемые *куперовские пары*.³⁷ Взаимодействие этих электронов с кристаллической решеткой сверхпроводника приводит ее в возбужденное состояние, а переход ее в основное состояние сопровождается излучением *фононов*.³⁸ Обмен куперовских электронов фононами приводит к притяжению между ними, которое действует на расстояниях порядка 10^4 периодов кристаллической решетки. В результате сверхпроводящая фаза движется сквозь сверхпроводник как целое, без столкновений с решеткой, что соответствует нулевому электрическому сопротивлению сверхпроводника. Состояние электронов сверхпроводника при температуре выше критической точки является симметричным, поскольку их импульсы и спины ориентированы хаотически, а состояние ниже критической точки – несимметричным, поскольку при этом возникает фаза куперовских электронов с фиксированной ориентацией спинов и импульсов.³⁹

В физику элементарных частиц идея спонтанного нарушения симметрии пришла благодаря Гейзенбергу, который занимался обоими разделами физики сразу. В качестве "твердого тела" этим частицам служит физический вакуум. При низких энергиях виртуальных частиц вакуум ведет себя как газ, – реальные частицы движутся в нем как в пустоте. Взаимодействием реальных частиц с виртуальными в этом случае можно пренебречь и учитывать его как возмущение.⁴⁰ При высоких энергиях виртуальных частиц вакуум ведет себя как физическая среда, аналогичная сверхпроводнику. При этом симметрия его состояния нарушается, и в нем закономерно возникают безмассовые безспиновые частицы, которые сегодня называются *голдстоуновскими бозонами* или просто *голдстонами*.

В 1961 году Голдстоун сформулировал теорему, согласно которой при спонтанном нарушении непрерывной симметрии состояния любой физической среды должны

³⁷ Названные так по имени одного из авторов квантовой теории сверхпроводимости (так называемой *БКШ-теории*), предложенной Бардиным, Купером и Шриффером в 1957 году.

³⁸ То есть безмассовых безспиновых квазичастиц, аналогичных магнонам в ферромагнетике. Фононы формируют звуковые волны в твердых телах. В данном случае в сверхпроводнике.

³⁹ Остальные электроны, не входящие в эту фазу, сохраняют симметричное состояние, т.е. являются несверхпроводящими и могут сталкиваться с решеткой. Но за электрическое сопротивление сверхпроводника они уже не отвечают, поскольку электрический ток всегда течет по пути наименьшего сопротивления.

⁴⁰ Например, как лэмбовский сдвиг – см. 2-ю часть.

возникать безмассовые безспиновые частицы, т.е. голдстоны. Общее математическое доказательство этой теоремы в 1962 году дали сам Голдстоун, а также Вайнберг и Салам. Они установили, что данная теорема справедлива как для нерелятивистских, так и для релятивистских сред.⁴¹ Тем не менее, она не находила применения в физике элементарных частиц, поскольку противоречила опыту. Было известно, что не всегда, но во многих случаях, нарушение симметрии состояния физической среды не сопровождается возникновением голдстонов. Только после открытия Хиггса стало ясно, что во всех случаях, когда при спонтанном нарушении симметрии не обнаруживались голдстоны, такая симметрия являлась калибровочной и локальной. При этом голдстоуновские бозоны связываются калибровочными бозонами, почему и не обнаруживают себя в эксперименте.

Механизм Хиггса является релятивистским аналогом эффекта Мейснера, поэтому сначала рассмотрим последний. Как я уже говорил, этот эффект заключается в выталкивании внешнего магнитного поля из внутреннего пространства сверхпроводника. При этом внешнее магнитное поле наводит токи в сверхпроводящей фазе электронов, которые создают внутреннее магнитное поле, силовые линии которого ориентированы навстречу силовым линиям внешнего поля. В результате внешнее поле изменяет свою конфигурацию (огибает сверхпроводник) и переходит в состояние с более высокой энергией.⁴² Если эта энергия не превышает энергию разрушения сверхпроводящей фазы, то такая конфигурация внешнего поля устойчива. А энергия сверхпроводящей фазы электронов – это ни что иное, как энергия фононов, т.е. голдстонов, связывающих в пары куперовские электроны. А внешнее магнитное поле – это ни что иное, как калибровочное поле, квантами которого являются калибровочные бозоны – фотоны. То есть получается, что поле фононов, сохраняя несимметричное состояние сверхпроводящей фазы, заставляет поле фотонов перейти в состояние с большей, чем обычно, энергией и ограниченным радиусом действия. А ограниченный радиус действия калибровочных бозонов в квантовой теории поля означает наличие у них массы покоя.

Релятивистская природа механизма Хиггса состоит в том, что он учитывает особый статус скорости света. В остальном он мало чем отличается от эффекта Мейснера. В простейшем варианте этого механизма один безмассовый калибровочный бозон, движущийся со скоростью света, имеет две взаимно перпендикулярные степени свободы – влево-вправо и вверх-вниз.⁴³ Взаимодействуя с полем Хиггса, он связывается одним голдстоном и обретает третью степень свободы – вперед-назад. При этом он затормаживается тем сильнее, чем сильнее взаимодействует с полем Хиггса. Последнее как бы сопротивляется ускорению бозона, а сопротивление ускорению – это и есть проявление инертной массы. Если же ускорения нет, то поле Хиггса не обнаруживает себя, но остается связанным с калибровочным бозоном, что обнаруживается при движении его в гравитационном поле.⁴⁴ В эффекте Мейснера это соответствует изменяющейся форме сверхпроводника.

⁴¹ Из только что рассмотренных к ним относятся ферромагнетики и обычные сверхпроводники. Вакуум, как сверхпроводник, является релятивистской средой. В ней голдстоны связывают вырожденные состояния, т.е. разные состояния с одной и той же энергией.

⁴² При этом наведенные токи продолжают циркулировать в тонком поверхностном слое сверхпроводника.

⁴³ У фотонов эти степени свободы соответствуют перпендикулярным векторам **E** и **H**. Третья степень свободы для них не доступна, поскольку скорость движения у них фиксирована. В механизме Хиггса эта степень свободы является фиктивной – она задействуется только на промежуточном этапе преобразований.

⁴⁴ В теориях объединения взаимодействий масса частиц возникает не за счет испускания и поглощения квантов скалярного поля, а за счет взаимодействия с классической, разлитой во всем пространстве, частью скалярного поля.

В теории электрослабого взаимодействия Вайнберга, Глэшоу и Салама массу покоя обретают калибровочные (промежуточные) бозоны слабого взаимодействия, а калибровочный бозон электромагнитного взаимодействия остается безмассовым. Кроме того, в этой теории обретают массы фермионы электромагнитного и слабого взаимодействий,⁴⁵ а один фермион слабого взаимодействия остается безмассовым.⁴⁶ В 1971 году т`Хоофт доказал перенормируемость этой теории, а в 1973 году она получила первое экспериментальное подтверждение.⁴⁷ Наконец, в 2012 году на Большом адронном коллайдере был обнаружен главный действующий герой этой теории – бозон Хиггса.

Следующим естественным шагом в этом направлении было присоединение к электромагнитному и слабому сильному взаимодействию. В 1974 году Джорджи, Куинн и Вайнберг показали, что если учесть виртуальные квантовые флуктуации частиц, то при уменьшении радиуса этих частиц интенсивности указанных взаимодействий станут сближаться и в конце концов совпадут.⁴⁸ Первую точку такого совпадения (10^2 Гэв) "застолбили" Вайнберг, Глэшоу и Салам в своей теории электрослабого взаимодействия, что затем подтвердилось в эксперименте обнаружением промежуточных бозонов при указанных значениях энергии. Следующую точку совпадения (10^{15} Гэв), учитывающую сильное взаимодействие, "застолбили" Джорджи и Глэшоу, предложившие в 1974 году так называемую *теорию Великого объединения взаимодействий*. Но рассчитывать на экспериментальное подтверждение эта теория не могла изначально, поскольку ускорители такой мощности построить на Земле невозможно.⁴⁹

В основе теории Великого объединения лежит тот же механизм Хиггса, что и в теории электрослабого объединения, поэтому рассматривать его я не буду. Главный интерес представляют ее предсказания. Так, все варианты этой теории предсказывают распад протона: $p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$; $p^+ \rightarrow \pi^+ + \nu$ и т.д. Этот распад является частным случаем превращения кварков и лептонов друг в друга, за которые отвечают массивные калибровочные бозоны Великого объединения X^\pm и Y^0 .⁵⁰ Время жизни протона, предсказываемое теорией Джорджи-Глэшоу, составляет $10^{31 \pm 2}$ лет.⁵¹ Поэтому, если взять соответствующее количество материи, то можно зарегистрировать распад протона в эксперименте. Такие эксперименты проводились, но не принесли результата, из чего еще не следует, что теория неверна. Другие варианты Великого объединения предсказывают большее время жизни протона, но их пока невозможно проверить в эксперименте.

Другим интересным предсказанием всех вариантов Великого объединения является существование магнитных монополей. Во второй части я говорил, что в гипотезе Дирака существование монополей препятствует введению векторных потенциалов электромагнитного поля в этих точках пространства-времени. Дирак обошел это

⁴⁵ То есть электрон, мюон, таон и их античастицы; а также кварки u-, d-, s-, c-, b-, t- и их античастицы.

⁴⁶ То есть нейтрино (электронные, мюонные и таонные) и соответствующие антинейтрино.

⁴⁷ Были обнаружены процессы, объясняемые существованием Z^0 -бозонов, предсказываемых этой теорией. Сами W^\pm - и Z^0 -бозоны были обнаружены в 1983 году.

⁴⁸ В 1991 году Амальди, Де Боер и Фюрстенау уточнили этот результат с учетом суперсимметрии. Дело в том, что работе Джорджи, Куинна и Вайнберга интенсивности трех негравитационных взаимодействий совпадали не полностью. Суперсимметрия позволила сделать это совпадение полным.

⁴⁹ Даже самый современный Большой адронный коллайдер, на котором был открыт бозон Хиггса, развивает энергию порядка 10^4 Гэв.

⁵⁰ Кроме того, они отвечают за превращение кварков и антикварков, а также лептонов и антилептонов друг в друга.

⁵¹ Для сравнения: время жизни нашей Вселенной – порядка 10^{10} лет.

препятствие, введя струну, изолирующую особенности этого поля от остального пространства-времени. В теории Великого объединения роль струны выполняет скалярное (хиггсово) поле. За счет него монополю обретает массу при спонтанном нарушении локальной симметрии, лежащей в основе этой теории. Монополь Великого объединения является солитоном калибровочного электромагнитного поля, т.е. топологически устойчивым состоянием этого поля с конечной энергией и конечными пространственными размерами. На больших расстояниях такой монополю ничем не отличается от монополя Дирака, но на меньших расстояниях он отличается от него существенно. В 1974 году модель такого монополя предложили Поляков и т'Хоофт.

Масса монополя Великого объединения на порядок больше энергии самого объединения – 10^{16} Гэв, – поэтому нет никакой надежды, что его когда-либо обнаружат в эксперименте. Протон вблизи монополя Великого объединения должен распадаться мгновенно – происходит своего рода катализ этого распада. Но распады протонов, как я уже говорил выше, не были обнаружены в эксперименте, что свидетельствует против существования таких монополей. Монополь Великого объединения имеет не только магнитный, но и цветовой заряд, а значит должен участвовать в сильном взаимодействии кварков. Некоторые модели сильного взаимодействия допускают такое участие,⁵² но этот вопрос пока далек от своего решения. Квантование электрического заряда в теории Великого объединения не зависит от существования монополя. Наоборот, и квантование заряда, и существование монополя в этой теории являются следствием спонтанного нарушения исходной группы симметрии Великого объединения до электромагнитной группы. При этом квантование электрического заряда следует из симметрии зарядов лептонов и кварков, а с квантованием магнитного заряда ее связывают преобразования изоспина.

Но самой главной проблемой теории Великого объединения является *проблема калибровочных иерархий*. Смысл ее состоит в том, что интервал между энергией Великого объединения и энергией электрослабого объединения составляет более десяти порядков величины.⁵³ И в этом интервале нет таких опорных точек, подобных точкам совпадения констант взаимодействий, которые могли бы регулировать процессы наделения частиц массой. Поэтому приходится искусственно подбирать параметры этих процессов в каждом порядке теории возмущений. Возможным решением этой проблемы считается такая корректировка стандартной модели, которая обладает дополнительной симметрией, устанавливающей более глубокую структуру частиц. Хорошим кандидатом на эту роль считается *теория суперсимметрии*, которая запрещает "некорректное" поведение масс при спонтанном нарушении симметрии взаимодействий за счет добавления к обычным частицам их суперсимметричных партнеров. Но реалистичные модели такой корректировки стандартной модели до сих пор не построены.

На этом, собственно, закончился второй этап поиска Единой теории, в котором исследователи исходили из принципов квантовой теории поля. Следующий этап, продолжающийся до настоящего времени, возглавляет теория суперструн. В предыдущей части я говорил, что эта теория развилась из дуальных моделей рассеяния адронов. В 1968 году Венециано нашел представление для амплитуды такого рассеяния, удовлетворяющее требованиям дуальности. В 1970 Намбу, Гото, Нильсен и Сасскинд показали, что теория Венециано описывает рассеяние одномерных объектов – струн. Эти

⁵² Например, модели Чанга и Швингера, которые я рассматривал в предыдущей части.

⁵³ В теории эта разница получила название *калибровочной пустыни*.

струны были чисто бозонными, и на их концах отсутствовали кварки. В 1971 году Рамон, Неве и Шварц модифицировали эту теорию, включив в нее фермионы. При этом оказалось, что новая теория включает суперсимметрию. Кроме того, выяснилось, что обе теории струн могут быть непротиворечивыми только при определенных размерностях пространства-времени, называемых *критическими*. Для струн Намбу-Гото-Нильсена-Сасскинда эта размерность равна 26, а для струн Рамона-Неве-Шварца – 10. Этот факт получил объяснение в работах, посвященных квантованию релятивистских струн.⁵⁴

Сразу же после этого возник вопрос, каким образом свертывать лишние измерения пространства-времени?⁵⁵ Рецепт такого свертывания уже был известен – Единая теория поля Калуцы-Клейна. Оставалось только сформулировать его в терминах теории струн. В 1984 году Канделас, Горовиц, Строминджер и Виттен показали, что свернутым измерениям пространства-времени в этой теории удовлетворяет класс 6-мерных *пространств Коллаби-Яу*. Это достижение совпало с началом так называемой *1-й революции в теории струн*.

В 1974 году Шерк и Шварц отождествили частицу со спином 2, закономерно возникающую в теории струн, с квантом гравитационного взаимодействия – гравитоном, – и провозгласили, что эта теория охватывает все фундаментальные взаимодействия. Их расчеты показали, что интенсивность взаимодействия струн обратно пропорциональна их натяжению. А поскольку гравитационное взаимодействие чрезвычайно слабое, то натяжение такой струны оказывается колоссальным – порядка планковской массы. Это на восемнадцать порядков больше энергии Великого объединения взаимодействий в стандартной модели. Обнаружить такие струны в эксперименте невозможно в принципе. Это означает, что теория струн изначально заявила о себе как об экспериментально непроверяемой теории.

В 1984 году Грин и Шварц устранили противоречия теории струн с квантовой теорией поля⁵⁶ и подтвердили, что она обладает достаточной широтой, чтобы охватить все четыре фундаментальных взаимодействия. Сегодня эта дата известна как начало 1-й революции в теории струн. В этом же году Киккава и Ямасаки показали, что если струна намотана на свернутое измерение, то коллапс вселенной такой струны поле прохождения планковского размера выглядит как расширение этой вселенной. То есть они обнаружили дуальность теории струн, связывающие два пространства с радиусами R и $1/R$. В 1988 году Брандербергер и Вафа показали, что если в теории струн есть свернутые измерения, то в ней есть два разных, но взаимосвязанных определения расстояния. Одному

⁵⁴ Можно сказать, что струны подстраивают под себя пространство-время, в котором живут. Точнее, они накладывают существенные ограничения на характеристики фонового пространства-времени (т.е. внешнего по отношению к мировому листу, заметаемому одномерной струной в световом конусе), заставляя фоновые поля подчиняться уравнениям движения струны. То есть зависимость фонового пространства-времени от движения струны определяется тем, что сама струна и ее движение являются частью этого пространства-времени.

⁵⁵ Поскольку пространство-время нашей Вселенной четырехмерно.

⁵⁶ До этого теория струн допускала тахионные состояния частиц и состояния с отрицательной вероятностью существования. Как устранить состояния частиц с отрицательной вероятностью существования в 1970 году показал Вирасоро, но он не смог устранить тахионные состояния. В 1977 году Глиозици, Шерк и Олив ввели в струну Рамона-Неве-Шварца специальную проекцию (так называемую ГШО-проекцию), позволяющую устранить тахионные состояния. В 1981 году Грин и Шварц описали эту проекцию в терминах 26-мерной суперсимметрии и сформулировали принцип устранения аномалий в теории струн типа I. В 1984 году они обобщили эти результаты на все теории суперструн.

соответствуют струны, намотанные вокруг свернутого измерения, а другому – не намотанные. Не намотанные струны соответствуют стандартному понятию длины, ответственному за проблемы теории струн на планковских расстояниях. Дуальность разрешила эти проблемы, показав, что расстояния, меньше планковских, не достигаемы.

В том же 1988 году Гросс и Менде обнаружили еще одну дуальность в теории струн, связывающую две вселенные с константами взаимодействия g и $1/g$. С точки зрения теории струн такие вселенные физически не различимы. Эта дуальность устранила бесконечные величины энергии взаимодействия, возникавшие в квантовой теории гравитации точечных частиц.

К 1985 году струнные теоретики осознали, что суперсимметрия может быть включена в теорию пятью различными способами: в виде теории струн типа I, теории струн типа IIA, теории струн типа IIB, теории гетеротических струн типа $O(32)$ и теории гетеротических струн типа $E_8 \times E_8$. В теории типа IIB колебания струн имеют одну и ту же киральность,⁵⁷ а в теории типа IIA – разную киральность. Теория типа I аналогична теории типа IIB, за исключением того, что последняя содержит только замкнутые струны, а первая – как замкнутые, так и открытые струны. В гетеротических теориях колебания струн с одной киральностью выглядят также, как в теориях типа II, а с противоположной киральностью – как в исходной теории бозонных струн. При этом первая киральность требовала 10 измерений пространства-времени, а вторая – 26 измерений. Между собой гетеротические теории различались топологией свернутых измерений пространства-времени.

Эта проблема портила настроение струнным теоретикам до 1995 года, когда Виттен предложил так называемую *M-теорию*,⁵⁸ объединяющую все пять теорий струн.⁵⁹ Согласно Виттену, для сильной константы взаимодействия в каждой из пяти теорий есть дуальное описание с помощью слабой константы взаимодействия в другой теории и наоборот. Ранее это было неизвестно потому, что во всех теориях взаимодействие струн описывалось в рамках теории возмущений, т.е. с помощью слабой константы взаимодействия. Так, например, свойства теории струн типа I в области сильной константы взаимодействия совпадают со свойствами теории типа $O(32)$ в области слабой константы взаимодействия и наоборот. Теория типа IIB является самодуальной, т.е. имеющей одинаковые свойства в области сильной и слабой констант взаимодействия. А если в теории типа IIA со слабой константой взаимодействия увеличивать эту константу до сильной, то свойства этой теории, позволяющие их анализировать в рамках теории возмущений, приводят к 11-мерной теории супергравитации.

Дело в том, что еще в 1978 году Креммер, Джулия и Шерк построили теорию 11-мерной супергравитации в рамках стандартной модели элементарных частиц. При этом лишние измерения пространства-времени, как и в теории Калуцы-Клейна, сворачивались. Эта теория оказалась более удачной, чем теория супергравитации Фридмана и Ньювенхайзена. Кроме того, как квантовая теория поля она оказалась наилучшим низкоэнергетическим приближением теории струн. Позднее выяснилось, что существует

⁵⁷ Киральность – это ориентация спина частицы относительно ее импульса. Киральность абсолютна только для безмассовых частиц, движущихся со скоростью света. Для частиц, обладающих массой покоя, киральность относительна.

⁵⁸ Название придумал сам Виттен. Его можно расшифровывать как мистическую теорию, мать всех теорий, мембранную теорию или матричную теорию.

⁵⁹ Сегодня эта дата считается началом 2-й революции в теории струн.

четыре разных теории 11-мерной супергравитации, отличающиеся способами реализации суперсимметрии. Три из них являются низкоэнергетическими пределами теорий струн типа IIA, IIB и $E8 \times E8$. Четвертая теория является низкоэнергетическим пределом теорий струн типа I и $O(32)$. Именно этот факт позволил Виттену установить их дуальность.

Еще один интересный факт, установленный Виттеном, состоит в том, что если в 10-мерной теории струн типа $E8 \times E8$ со слабой константой взаимодействия увеличивать эту константу до сильной, то в теории появляется дополнительное измерение пространства. При этом изменяется структура самой струны – она становится *2-браной*.⁶⁰ В условиях слабой константы взаимодействия эта струна ведет себя как 1-брана, а в условиях сильной константы взаимодействия – как 2-брана. Новое измерение не является измерением, в котором может колебаться струна, поскольку входит в структуру самой струны.

Аналогичная картина возникает в теории струн типа IIA при увеличении слабой константы взаимодействия до сильной. Кроме того, теория струн типа IIA со свернутым измерением радиуса R тождественна теории струн типа IIB со свернутым измерением радиуса $1/R$. То же самое относится и к теориям струн типа $O(32)$ и $E8 \times E8$. С учетом этих дуальностей все пять теорий струн (включая M-теорию) оказываются дуальными друг другу. При этом 2-браны присутствуют во всех пяти теориях. Более того, в них присутствуют и браны высших размерностей, вплоть до 9-бран. Браны высших размерностей имеют меньшую массу и играют важную роль в области энергий M-теории.

Есть в M-теории и 0-браны. На больших расстояниях они ведут себя как точечные частицы, но на малых расстояниях их свойства совершенно иные. На расстояниях, меньше планковских, они обнаруживают неадекватность обычных понятий пространства и времени. При этом обычная геометрия заменяется так называемой *некоммутативной геометрией*, разработанной Аленом Конном в 1990 году. В ней обычные понятия пространства и расстояния между точками заменяются другими понятиями.

Завершая обзор теории суперструн, хочу сказать несколько слов о ее взаимоотношениях со стандартной моделью элементарных частиц. Дело в том, что процесс в одной из пяти теорий струн, который сильно зависит от квантовых эффектов, преобразованиями дуальности может быть сведен к процессу в другой теории струн, слабо зависящему от квантовых эффектов. Например, к процессу, который может происходить в чисто классическом мире. Это означает, что квантовая механика тесно переплетается с симметриями дуальности, – они являются неотъемлемыми симметриями квантовой механики, поскольку одно из дуальных описаний сильно зависит от квантового рассмотрения. Поэтому полная теория струн не может начинаться с классического рассмотрения, а затем подвергаться обычному квантованию, как это делается в квантовой теории поля. Если начинать с классической формулировки, то симметрии дуальности будут потеряны, поскольку они имеют место только если квантовые эффекты сразу принимаются во внимание. И если стандартная модель намерена охватить все фундаментальные взаимодействия, то также должна учитывать этот факт.

Распутывание этого "клубка" я начну с теории суперсимметрии, т.е. симметрии между фермионами и бозонами. До появления этой теории бозоны рассматривались как носители взаимодействий, а фермионы – как носители материи. Это разделение особенно

⁶⁰ Брана – сокращенное название от мембраны. 1-мерная струна – это 1-брана.

укрепилось с появлением калибровочных теорий, в которых бозонные поля играют роль калибровочных полей, непосредственно связанных с группой симметрии теории, а фермионные поля вводятся "руками" извне. (То есть свойства бозонных полей в данной теории однозначно определяются ее симметрией, а фермионные поля принадлежат произвольным представлениям этой симметрии). При этом возникают проблемы с описанием виртуальных взаимодействий бозонных и фермионных полей с вакуумом. Классический пример таких проблем демонстрировала квантовая электродинамика до появления теории перенормировки.

Теория суперсимметрии решает эти проблемы другим способом, нежели теория перенормировки. Основное состояние (вакуум) в ней имеет нулевую энергию. При этом положительная энергия бозонных нулевых колебаний полностью компенсируется отрицательной энергией фермионных нулевых колебаний. Это – проявление знаменитого сокращения бесконечной энергии нулевых колебаний при бесконечном увеличении импульсов виртуальных частиц в суперсимметричных теориях. До появления таких теорий энергию вакуума делали нулевой с помощью искусственного приема – *нормального упорядочения* операторов рождения и уничтожения частиц. При этом требование нормального упорядочения не следовало из принципов квантовой теории поля, что говорит о ее внутренней несогласованности. Но и отбросить нулевые колебания тоже нельзя, поскольку они вполне реальны.⁶¹ Теория перенормировки "решила" эту проблему тем, что "замела ее как мусор под ковер".⁶²

С точки зрения суперсимметричных теорий бесконечные энергии бозонного и фермионного вакуумов являются следствием искусственного разделения нулевой энергии единого бозонно-фермионного вакуума на положительные и отрицательные бесконечные слагаемые. Особенно интересно то, что это свойство присуще теориям не только свободных, но и взаимодействующих полей, причем вне рамок теории возмущений. К примеру, можно было поступить и наоборот: с целью сокращения ненулевой энергии бозонных нулевых колебаний ввести в чисто бозонную теорию дополнительные фиктивные степени свободы. Такой рецепт не менее законен, чем нормальное упорядочение. Но при этом дополнительные степени свободы имели бы фермионный характер, иначе не произошло бы сокращение энергий нулевых колебаний. Более того, при этом теория обладала бы суперсимметрией взаимоотношений "реальных" бозонов и "фиктивных" фермионов!

В моей модели бозонов, как таковых, нет, есть только состояние прямого контакта (взаимодействия) между электрическими и магнитными зарядами, в котором они обмениваются импульсами и энергией. То, что мы понимаем под бозонами – это наша сегодняшняя интерпретация состояний магнитных фермионов. Эти состояния не наблюдаемы, как и состояния "свободных" бозонов.⁶³ Представление о бозонах возникает тогда, когда материя магнитных зарядов нелокально взаимодействует с нашей материей. А поскольку современная физика рассматривает все взаимодействия как локальные, то для объяснения наблюдаемых явлений она предлагает модель бозонов как частиц,

⁶¹ Например, лэмбовский сдвиг в квантовой электродинамике.

⁶² Так Дирак однажды отозвался об этой теории. Точнее, примерно так.

⁶³ Помните хохму из "ДМБ"?

– Ты НЛО видишь?

– Нет.

– И я не вижу. А оно есть!

свободно распространяющихся в пространстве от одного взаимодействия с фермионной материей до другого. Основой этой модели является представление о пространстве как пустоте, в которой размещаются материальные тела и частицы. Это представление сложилось исторически в ходе развития нашей цивилизации и до сих пор поддерживается наукой.

В моей модели пространство рассматривается как иллюзорное восприятие материи магнитных зарядов, "забывающей битком" все пространство нашей Вселенной, не занятое нашей материей. Эту иллюзию создают для нас духовые поля, изменяющие геометрию нашей материи и материи магнитных зарядов таким образом, что друг для друга они становятся нелокальными объектами. Это условие является главным для превращения материи магнитных зарядов в пространство-время нашей материи, но не единственным. Помимо этого духовые поля изменяют топологию материи магнитных зарядов так, что пространство-время нашей Вселенной обретает локальную геометрию, обеспечивающую передачу воздействия от одного материального тела к другому с помощью "силового поля" только с конечной скоростью. Даже контактное взаимодействие материальных тел нашей Вселенной, в котором им нужно сначала добраться друг до друга, обеспечивается этой топологией материи магнитных зарядов.

Такая точка зрения несколько меняет смысл суперсимметрии вакуума. В моей модели бозонный вакуум является фиктивным, а фермионные вакуумы электрических и магнитных зарядов – реальными. При этом последние имеют положительную энергию, но вакуум электрических зарядов – действительную, а вакуум магнитных зарядов – мнимую. Фиктивный вакуум бозонов имеет отрицательную энергию, которая также проявляет себя двояко. При взаимодействии электрических зарядов с этим вакуумом он "обнаруживает" действительную отрицательную энергию, а при взаимодействии магнитных зарядов – мнимую отрицательную энергию. Обеспечивается это теми же духовыми полями, которые делают нелокальными взаимоотношения материи электрических и магнитных зарядов. Это означает, что все безмассовые бозонные поля в нашей Вселенной – электромагнитное, цветное и гравитационное – являются духовыми полями. Массивные бозонные поля нашей Вселенной также представлены в них, но несколько по-другому – в виде своих суперпартнеров.

В предыдущей части я говорил, что в тех моделях суперсимметрии, которые включают известные нам элементарные частицы, у каждой из них появляется суперпартнер, имеющий точно такие же свойства, но спин – меньше на пол единицы. Для электрона таким партнером является сэлектрон, имеющий нулевой спин, для кварка – скварк, также имеющий нулевой спин, для фотона – фотино, имеющее полуцелый спин, для глюона – глюино, также имеющее полуцелый спин. Проблема заключается в том, что в окружающей нас реальности такие суперпартнеры не наблюдаются. Сегодня это объясняют тем, что в нашей Вселенной суперсимметрия является нарушенной.

В моей модели проблема отсутствия суперпартнеров в нашей Вселенной также актуальна. В ней присутствует суперсимметрия, а значит должны быть и суперпартнеры. И моя модель действительно допускает их существование при некоторых оговорках. Более того, в ней присутствует и нарушение суперсимметрии,⁶⁴ а значит имеется и оправдание

⁶⁴ Таковым является ограничение рассматриваемых систем отсчета в теории только системами отсчета нашей Вселенной.

ненаблюдаемости суперпартнеров. Проблема в том, что существование суперпартнеров в моей модели следует главным образом из того, что этого требует теория суперсимметрии, а упомянутые оговорки сводятся к построению условий, при которых они могут существовать. Но это построение недостаточно строго привязано к остальным элементам модели. Поначалу я даже склонялся к тому, что требование существования суперпартнеров является следствием неоправданного распространения теории суперсимметрии на пространство-время нашей Вселенной. Но потом я нашел нужное решение, сохраняющее ведущую роль духовых полей в суперсимметрии.

Духи ⁶⁵ возникают в любой релятивистской квантовой теории, поскольку в такой теории всегда есть место для полей с отрицательной вероятностью существования. Обычно от них стараются избавиться, но это удается далеко не всегда и даже более, они оказываются необходимыми. Например, в теории суперструн духи возникают при квантовании струн. В одном из вариантов такого квантования – *формализме светового конуса* – духи явным образом удаляются из теории. Достоинством этого варианта является его унитарность, а недостатком – потеря релятивистской инвариантности. В другом варианте – *формализме Гупты-Блейера*, – в котором пытаются сохранить лоренц-инвариантность, духи остаются в теории, а ограничения накладываются на векторы состояния струн. В этом формализме выполнено большинство вычислений по теории суперструн. Недостатком его является то, что наложение ограничений на состояния струн затруднительно, особенно на уровне взаимодействий. Наконец, в так называемом *формализме BRST*, ⁶⁶ сохраняющим унитарность и лоренц-инвариантность, вместо наложения ограничений на векторы состояния струн, используются духи Фаддеева-Попова. ⁶⁷ При анализе этого варианта выяснилось, что духи являются не просто вспомогательными полями, а проявлением более глубокой симметрии, заложенной в теорию. Природа этой симметрии пока не понятна.

В моей модели эта симметрия называется *симметрией перпендикулярного времени*. ⁶⁸ Перпендикулярное время – это бозонные поля в состоянии, промежуточном между их излучением электрическими зарядами и поглощением магнитными зарядами (или наоборот). Ясно, что эти поля являются духами, т.е. фиктивными полями. Тем не менее, можно предположить, что в данном состоянии кванты этих полей могут распадаться на пары фермионов частица-античастица. Точно также в нашем времени (назовем его *прямым*) фотоны могут распадаться на электронно-позитронные пары, а глюоны – на кварк-антикварковые пары. ⁶⁹ Просто отношения между перпендикулярным и прямым временем относительны – то, что является перпендикулярным временем для нас, в самом этом времени ничем не отличается от нашей Вселенной, а наше время, наоборот, воспринимается "ими" как перпендикулярное. ⁷⁰ При этом то, что является духовыми полями для нас и вселенной магнитных зарядов, является материей перпендикулярного

⁶⁵ В зарубежной литературе духи часто называют *гостами*.

⁶⁶ Бекки-Руэ-Стора-Тютина.

⁶⁷ Для уничтожения частиц с отрицательной вероятностью существования.

⁶⁸ Название объясняется тем, что эта идея позволяет объяснить природу статистики фермионов. Например, изменение знака их волновой функции при повороте в пространстве на 360°. Перпендикулярное время можно рассматривать как области абсолютно удаленного на световом конусе Минковского, а прямое время – как области абсолютно будущего и абсолютно прошлого.

⁶⁹ Как ведут себя в этом случае гравитоны и мезоны, я объясню чуть позже.

⁷⁰ С учетом того, что все фермионы нашей Вселенной спарены с соответствующими фермионами магнитной вселенной, это вполне логично (см. две предыдущие части).

времени, и наоборот, то, что является материей для нас и вселенной магнитных зарядов является духами для перпендикулярного времени.

Главная особенность перпендикулярного времени состоит в том, что в системе отсчета прямого времени в нем (перпендикулярном времени) отсутствуют геометрические различия между вселенными электрических и магнитных зарядов. То есть в этой системе отсчета данные вселенные не являются друг для друга пространствами, а значит эти пространства не могут обеспечить локальность взаимодействий в данных вселенных. Кроме того, материя данных вселенных не является материей в обычном смысле этого слова. Это – нечто среднее между материей и пространством, т.е. духовые поля. Но если указанная система отсчета переносится в перпендикулярное время, то уже оно становится прямым временем, и в нем возникают геометрические отличия между вселенными электрических и магнитных зарядов, а бывшее прямое время обретает свойства перпендикулярного.

В первоначальном варианте данной части эта симметрия была основой моей модели. Она была достаточно красивой и позволяла включить гравитацию, а значит объединить все взаимодействия. Но что-то в ней мне не нравилось,⁷¹ поэтому я не спешил с публикацией. В конце концов я понял, что в ней нет движения во времени как такового. Переходы частиц по струнам в ней осуществляются только в пространстве, а время присутствует только в виде пространственных процессов, т.е. в том же виде, что и в нашей Вселенной. При этом утрачивается смысл моего утверждения в предыдущей части, что массовое поле материи нашей Вселенной является ее абсолютным будущим, а массовое поле вселенной магнитных зарядов – ее будущим. Кроме того, при этом утрачивается смысл моего утверждения, что ароматы кварков маркируют разные моменты настоящего нашей Вселенной.

Как я уже сказал, в этом варианте перпендикулярное время не содержало суперпартнеров обычных элементарных частиц и было полностью симметричным прямому времени. При этом движение вселенных электрических и магнитных зарядов во времени осуществлялось в виде мигания, т.е. поочередного существования прямого и перпендикулярного времени. Сохранение информации о структуре материи распавшегося прямого времени при этом обеспечивала структура материи перпендикулярного времени и наоборот. Но конкретные механизмы такого сохранения я так и не смог представить. Еще большей проблемой оказалась интерпретация гравитонов и гравитино.

Поэтому я изменил первоначальную интерпретацию перпендикулярного времени и предположил, что в промежуточном состоянии безмассовые бозоны прямого времени могут образовывать суперпартнеров-ино. Например, фотино, глюино и мезино. Как и все духовые поля, эти частицы имеют отрицательную вероятность существования и различаются тем, к какой из вселенных перпендикулярного времени они "приписаны". К одной вселенной "приписаны" фотино, глюино и мезино, а к другой – их античастицы, т.е. антифотино, антиглюино и антимезино. Различаются они направлениями, в которых фотоны, глюоны и мезоны переходят между вселенными электрических и магнитных зарядов. С другой стороны, при переходах фермионов прямого времени по струне между вселенными электрических и магнитных зарядов, они могут образовывать

⁷¹ Не нравилось сильно, в отличие других частей, которые я несколько раз публиковал, правил и снова публиковал. Потому что в них правильным было главное.

с-суперпартнеров. Эти частицы также имеют отрицательную вероятность существования и также "приписаны" к одной из вселенных перпендикулярного времени. Конкретную форму этих суперпартнеров я укажу позже, поскольку она требует дополнительного уточнения.

Таким образом, у меня получилось, что суперпартнеры элементарных частиц нашей Вселенной и вселенной магнитных зарядов составляют более глубокую структуру духовых полей перпендикулярного времени. Они образуют вселенные данного времени, в которых отсутствует деление на материю и пространство. Причем статус этих вселенных и вселенных прямого времени опять же относителен – при переходе в систему отсчета одной из вселенных перпендикулярного времени ее частицы-суперпартнеры превращаются в знакомые нам элементарные частицы, и эта вселенная становится не отличимой от нашей. При этом наша бывшая Вселенная превращается в одну из вселенных перпендикулярного времени. Все эти метаморфозы осуществляют те же духовые поля. То есть их функция расширяется – они обеспечивают различие геометрий вселенных не только разных направлений прямого времени, но также прямого и перпендикулярного времени.

Прежде чем продолжить, укажу место гравитации в моей модели. Если вы читали две предыдущие части, то уже могли понять, что к чему. Поскольку пространство-время нашей Вселенной образует материя магнитных зарядов, то ясно, что именно она должна представлять гравитационные поля нашей материи. Особенно очевидным это становится, если вспомнить, что материя нашей Вселенной и материя вселенной магнитных зарядов в моей модели теснейшим образом связаны друг с другом переходами элементарных частиц по струнам. Ясно, что это должно сказываться не только на характере электромагнитного и сильного взаимодействий нашей материи, но и на кривизне нашего пространства-времени, поскольку эта кривизна формируется электромагнитным и сильным взаимодействиями материи магнитных зарядов. Единственное белое пятно в этой картине – это гравитационные волны и их кванты. То есть мне остается указать только место квантовой гравитации в моей модели.

Сначала напомним структуру лептоно-барионов, которую я рассматривал в предыдущей части. Каждый электрон нашей Вселенной связан струной с тяжелым монополюм вселенной магнитных зарядов, который является античастицей по отношению к нашему протону. Назовем такой монополюм *m-антипротоном*. И наоборот, каждый протон нашей Вселенной связан струной с легким монополюм вселенной магнитных зарядов, который является античастицей по отношению к нашему электрону. Назовем такой монополюм *m-позитроном*.⁷² Далее, поскольку протоны состоят из трех кварков, а *m-антипротоны* – из трех *m-антикварков*, то упомянутые выше струны должны распадаться на три струны. При этом возникает проблема стыковки данных струн с *m-позитроном* и *электроном*. В предыдущей части я показал, что целочисленность зарядов электрона и *m-позитрона* относительна, в определенных условиях они могут меняться местами с *m-антипротоном* и *протоном*, что равносильно распаду их на три дробных заряда и слиянию дробных составляющих *m-антипротона* и *протона* в целочисленные заряды. В обычных условиях духовые поля фиксируют одни концы этих струн в виде целочисленного заряда, что и определяет лептонный статус электрона и *m-позитрона*, а другие концы оставляют

⁷² Структуру лептоно-барионов, образуемых нейтронами и нейтрино, я здесь не рассматриваю, поскольку она не влияет на последующие рассуждения.

свободными, что и определяет барионный статус протона и м-антипротона. Именно такую структуру я назвал лептоно-барионом. Она определяет взаимосвязанное дробно-целочисленное квантование электрических и магнитных зарядов.

Переходы лептоно-барионов между вселенными электрических и магнитных зарядов осуществляются через вселенные перпендикулярного времени. Это означает, что концы их струн становятся равноправными, и их структуру можно рассматривать как тройки мезонов. Отличие этих мезонов в том, что они являются безмассовыми, поскольку масса частиц может возникать только при различии геометрий вселенных электрических и магнитных зарядов. В то же время эта структура остается цельной, а значит не утрачивает исходные фермионные свойства. Совместить эти условия можно только если предположить, что в перпендикулярном времени эта структура представляет одновременно фермион и бозон. Или, по-другому, единый фермионо-бозон. Так вот, я утверждаю, что фермион в этой структуре представляет гравитино, а бозон – гравитон. Функция гравитино заключается в том, чтобы поддерживать стабильность гравитона при переходах между вселенными электрических и магнитных зарядов. Это означает, что квантовая гравитация осуществляется исключительно в перпендикулярном времени. Квантовая гравитация – это динамика лептонно-барионных струн, а статика этих струн – это классическая гравитация нашей Вселенной.⁷³

Теорию гравитино в 1941 году разработали Швингер и Рарита.⁷⁴ При этом оказалось, что все попытки ввести в нее взаимодействие с частицами меньших спинов (т.е. с обычными частицами) приводят к противоречиям. Так, например, в некоторых вариантах этой теории сигналы распространялись быстрее света. Сегодня ясно, что эти попытки провалились потому, что связать гравитино с другими частицами можно только суперсимметричным образом. В теории супергравитации гравитино возникает как необходимый партнер гравитона. Пока не ясно, какие свойства оно имеет. В простейшем варианте супергравитации оно имеет нулевую массу покоя и связана с другими частицами микроскопическими силами тяготения. Простейший вариант описывает мир, состоящий только из гравитона и гравитино. Это, конечно, не реальный мир, поскольку в нем нет места для обычных элементарных частиц.

В моей модели такой мир является единственным, в котором могут существовать гравитон и гравитино. Потому что в моей модели отпадает необходимость в суперпартнерах фермионов нашей Вселенной – все виды этих фермионов охватываются двумя видами лептонно-барионной структуры. Суперпартнеры фотонов, глюонов и мезонов (т.е. фотино, глюино и мезино) в этом мире также имеются,⁷⁵ их функция, как и функция гравитино, заключается в поддержании стабильности фотонов, глюонов и мезонов при переходах между вселенными электрических и магнитных зарядов. Как и гравитино, они существуют только в момент перехода фотонов, глюонов и мезонов через перпендикулярное время. Разница в том, что гравитино и гравитоны забирают с собой всю

⁷³ То есть с точки зрения квантовой гравитации лептонов, как фундаментальных партнеров кварков, нет. Есть только кварки, а лептоны – это одна из форм целочисленного (электрического или магнитного) заряда, образуемого из кварков. Лептокварки Великого объединения – это на самом деле исчезновение лептонно-барионных структур из прямого времени и превращение их в гравитино-гравитонные структуры перпендикулярного времени.

⁷⁴ Точнее, теорию частиц со спином 3/2. Гравитино также имеет этот спин.

⁷⁵ Включение мезонов в эту группу необходимо для того, чтобы в перпендикулярном времени полностью отсутствовали суперпартнеры фермионов.

структуру лептоно-барионов, а фотоны, глюоны и мезоны оставляют ее на месте, забирают с собой только часть ее энергии. Гравитон входит в ту же группу фотонов, глюонов и мезонов. Его специфика в том, что для него нет фермионов, которые его излучают и поглощают. У него есть только гравитино, с которым он связан только в перпендикулярном времени. И только в этом времени он существует, как фотоны, глюоны и мезоны.

В предыдущей части я говорил, что теория супергравитации объединяет, с одной стороны, пространственно-временные и внутренние симметрии частиц в одну калибровочную теорию, а с другой стороны, – калибровочные и материальные поля в единую симметрию. В такой теории реализуется идея, что фермионные поля, обычно отождествляемые с материей, могут быть калибровочными полями. Это приводит к тонкой взаимосвязи между геометрией пространства-времени и квантово-механическим понятием спина. Другая сторона этой медали состоит в том, что при попытке прямолинейного расширения теории супергравитации получается одновременно избыток и недостаток обычных элементарных частиц. Некоторые известные частицы отсутствуют в этой теории, а новые, наоборот, появляются. Не известен способ корректного нарушения суперсимметрии, который не приводил бы к такому результату, не понятен смысл сокращения расходимостей в суперсимметричных теориях при явной неадекватности теории возмущений в подобных условиях.

Суперсимметричное сокращение расходимостей в моей модели объясняются дуальными взаимоотношениями между вселенными прямого и перпендикулярного времени. В таких условиях теория возмущений, конечно, не применима. Но суперсимметричные отношения бозонного и фермионного вакуумов вполне вписываются в эти условия, поскольку бозонный вакуум представляет перпендикулярное время, а фермионный – прямое время. Взаимосвязь между геометрией пространства-времени и квантово-механическим понятием спина в моей модели определяется той же симметрией прямого и перпендикулярного времени. При этом фермионные поля в ней становятся калибровочными только в перпендикулярном времени и только в виде суперпартнеров наших бозонов. Это и есть то самое нарушение суперсимметрии, которое корректно вводит в теорию обычные элементарные частицы. Механизм такого нарушения я рассмотрю в конце данной части (при анализе механизма Хиггса), а пока объясню, каким образом в моей модели осуществляется движение вселенных электрических и магнитных зарядов во времени.

Для начала напомним, что взаимодействие протонов и нейтронов в ядрах атомов осуществляется за счет их обмена пионами. Если последние имеют электрический заряд, то при обмене такими пионами протоны и нейтроны превращаются друг в друга. Электрически нейтральные пионы не вызывают таких превращений, но, как и первые, обеспечивают притяжение между протонами и нейтронами. Обычно это взаимодействие рассматривается только в пространстве – оно обеспечивает устойчивую структуру атомного ядра и не более того. Время нашей Вселенной обтекает это ядро, "ненавязчиво" маркируя моменты данного взаимодействия. В моей модели это время включено в саму структуру протонов и нейтронов в виде конкретного свойства кварков – аромата, – поэтому в ней такая ситуация не допустима. В моей модели время не просто маркирует превращения протонов и нейтронов друг в друга, оно организует эти превращения в определенном порядке и выводит их за пределы настоящего нашей Вселенной как в прошлое, так и в будущее.

Осуществляется это примерно так. Представьте себе некий экзотический "нейтрон", состоящий из трех d-кварков. (То, что этот "нейтрон" имеет электрический заряд -1 , сейчас не важно. Важно лишь то, что он может превращаться в обычный нейтрон). А теперь представьте, что этот "нейтрон" поглощает положительно заряженный пион и превращается в обычный нейтрон, утрачивая электрический заряд. Далее этот нейтрон поглощает еще один положительно заряженный пион и превращается в протон. Наконец, этот протон поглощает еще один положительно заряженный пион и превращается в экзотический "протон", состоящий из трех u-кварков. (То, что этот "протон" имеет электрический заряд $+2$, сейчас также не важно. Важно лишь то, что обычный протон может превращаться в него).

Различие электрических зарядов будущих и прошлых лептоно-барионов объясняется тем, что в магнитной вселенной изменение этих зарядов идет в обратном порядке, т.е. величина их уменьшается с (-2) до $(+1)$ при поглощении m-пионов. Другие знаки этих зарядов (по сравнению с приведенными выше) объясняются тем, что при переходе лептоно-бариона с зарядом $(+2)$ из нашей Вселенной во вселенную магнитных зарядов он меняет свою кварковую структуру на антикварковую. То же самое происходит и при переходе лептоно-бариона с зарядом $(+1)$ из вселенной магнитных зарядов в нашу Вселенную – он меняет свою антикварковую структуру на кварковую.

А теперь расставим все "по полочкам". Экзотический "нейтрон" находится на границе настоящего нашей Вселенной с ее будущим и представляет собой виртуальный конденсат перехода соответствующего лептоно-бариона по струне через перпендикулярное время.⁷⁶ После превращения в обычный нейтрон он включается в структуру материи нашей Вселенной. В свою очередь, экзотический "протон" находится на границе настоящего нашей Вселенной с ее прошлым и представляет собой виртуальный пар⁷⁷ перехода соответствующего лептоно-бариона по струне через перпендикулярное время. Так вот, я утверждаю, что все без исключения лептоно-барионы переходят по струне между вселенными электрических и магнитных зарядов только в экзотической форме. Их экзотичность определяется духовыми полями. В обычной форме они составляют структуру материи нашей Вселенной. При этом движение вселенных электрических и магнитных зарядов во времени можно представить себе как "отщипывание" экзотических лептоно-барионов от массового поля нашей Вселенной и последующее "пришлепывание" их к массовому полю вселенной магнитных зарядов.⁷⁸ Допускаю, что прослойка таких лептоно-барионов в будущем и прошлом нашей Вселенной может быть достаточно "толстой".

Хочу еще раз подчеркнуть. В обычной форме лептоно-барионы составляют структуру нашей Вселенной и вселенной магнитных зарядов. Эта форма является динамической, поскольку структура лептоно-барионов непрерывно смещается во времени относительно будущей и прошлой границ⁷⁹ настоящего нашей Вселенной и вселенной магнитных зарядов. Стабильность этой формы обеспечивают виртуальные и реальные фотоны, глюоны, пионы и гравитоны, которыми обмениваются электрические и магнитные заряды. Виртуальные фотоны, глюоны, пионы и гравитоны обеспечивают львиную долю этой

⁷⁶ В виде пары гравитино-гравитон.

⁷⁷ Пар здесь имеет смысл антипода конденсата, т.е. испарения.

⁷⁸ Во вселенной магнитных зарядов это "отщипывание" и "пришлепывание" происходит в обратном направлении.

⁷⁹ Эти границы задают d- и u- экзотические лептоно-барионы.

стабильности, прежде всего структуру материи. Реальные фотоны и пионы⁸⁰ обеспечивают эту стабильность только в динамике, т.е. только стабильность процессов. При каждом переходе всех этих частиц между вселенными электрических и магнитных зарядов у них фиксируется (в перпендикулярном времени) соответствующий суперпартнер. Вид суперпартнера (суперпартнер или антисуперпартнер) определяется направлением, в котором бозоны переходят между вселенными электрических и магнитных зарядов.

Ну и последний элемент, который я хочу ввести в рисуемую картину. Как я сказал выше, при рассмотрении проблемы суперпартнеров поначалу я склонялся к тому, что требование существования суперпартнеров является следствием неоправданного распространения теории суперсимметрии на пространство-время нашей Вселенной. Потом я нашел нужное решение. Дело оказалось не в пространстве-времени нашей Вселенной, а в том, что вся структура прямого и перпендикулярного времени построена на спинах. В прямом времени спины фиксированы, перпендикулярное время позволяет их изменять, но формы такого изменения также фиксированы. Продолжая эту аналогию, можно предположить, что за пределами перпендикулярного времени должны существовать такие области мироздания, в которых изменение спинов абсолютно произвольно. Такое изменение можно рассматривать как обобщение суперсимметрии. Так вот, я утверждаю, что данные области – это и есть легендарное Единое поле, которым грезит современная физика.

Вы спросите, какие у меня основания так считать? Да все, что я сказал здесь и в предыдущих частях. Везде я подводил к тому, что спиновое движение – это и есть настоящая топологическая форма элементарных частиц, к которой "прицепляются" все остальные свойства этих частиц. Более того, все остальные свойства элементарных частиц – это просто различные условия равновесной и неравновесной динамики спинов. Это подтверждает и теория супергравитации, утверждающая, что внутренние симметрии элементарных частиц могут объединяться с пространственно-временными симметриями только на основе спиновой симметрии. Потому что и внутренние симметрии этих частиц, и пространственно-временные симметрии, имеют духовую природу. Без спинов эта природа просто перестанет существовать, исчезнет в Едином поле.

Помните Единую теорию поля Мизнера-Уилера, которой я завершил описание первого этапа поисков такой теории? Они утверждали, что гравитационное и электромагнитное поля существуют изначально как свойства пространства-времени, независимо от источников.⁸¹ А то, что мы принимаем за источники этих полей, формирует топология пространства-времени. Дальше, как вы помните, они споткнулись о невозможность проквантовать эти поля с помощью топологии и обратились к идее предгеометрии, из которой тоже ничего не вышло.⁸² А между тем, они были недалеко от истины. Гравитация и электромагнетизм действительно являются непрерывными свойствами пространства-времени, как и вообще все силовые поля. И с помощью топологии действительно можно построить источники этих полей. Вопрос лишь в форме такой топологии. Эту форму не смогла пока что найти даже теория суперструн, дальше других продвинувшаяся на этом пути.

⁸⁰ Глюоны и гравитоны могут быть только виртуальными.

⁸¹ Хочу напомнить, что их теория основана на более ранней работе Райнича, который показал, что электромагнитное поле без источников изначально содержалось в общей теории относительности.

⁸² Я, кстати, не упомянул тогда их идею суперпространства, наделяющую их геометродинамику еще и спиновым свойством.

А помните Единую теорию поля Вейля, с которой я начал данную часть? Он, конечно, был гораздо дальше от истины, чем предыдущие авторы, но масштабная инвариантность в его теории вполне могла связать две вселенные с относительными размерами. Вейль рассматривал эту инвариантность в каждой точке пространства-времени (отчего все часы в его теории "посходили с ума"), а нужно было рассматривать ее у двух равноправных вселенных, одна из которых имеет точечные размеры, а другая – бесконечные.⁸³ Правда встречное время в такой теории нельзя получить, для этого нужно, чтобы материя одной вселенной была пространством для другой вселенной и наоборот. То есть нужно было ввести в его теорию еще и суперсимметрию. Это попутно объединило бы и гравитацию с электромагнетизмом. В конце данной части я покажу, что даже квантовую гравитацию можно представить как разновидность электромагнитного взаимодействия.

То же самое можно сказать и о теории Калуцы-Клейна. Свернутые измерения – это, конечно, хорошая идея. Но зачем заикливаться только на ней одной? В моей модели, к примеру, измерения вселенной магнитных зарядов свернуты примерно так же, как в теории Калуцы-Клейна,⁸⁴ зато материя этой вселенной, образно говоря, ни в какие измерения не лезет. А измерения перпендикулярного времени и вовсе перемешаны с ее материей. Теория суперструн также недалеко продвинулась в этом, хотя в ней есть и свернутые измерения, и вселенные с дуальными пространственными размерами. Но этого еще не достаточно для полноценной Единой теории поля.

Хороший пример: однажды струнные теоретики обнаружили, что бессмысленные результаты в уравнениях теории чувствительны к числу направлений, в которых могут колебаться струны. Отрицательные вероятности существования возникают из-за "недостатка" пространственных измерений; если бы струны могли колебаться в девяти пространственных измерениях, то отрицательные вероятности исчезли бы. При этом теория Калуцы-Клейна позволяет согласовывать дополнительные измерения с измерениями пространства нашей Вселенной. В результате суперсимметрия и квантовая гравитация в этой теории "повисли в воздухе"...

Что касается Единых теорий поля Эйнштейна, то здесь говорить не о чем. Разве только о теории Эйнштейна-Картана, равносильной Единой теории поля Эйнштейна с несимметричным метрическим тензором. Как я уже сказал, Картан предвосхитил эту теорию, показав, что если в общей теории относительности вместо переноса вектора задать в каждой точке пространства-времени его кручение (т.е. одновременно перенос и поворот), то в этих точках можно определить тензор энергии-импульса материи. Эта процедура равносильна процедуре задания антисимметричной связности в каждой точке пространства-времени в теории Эйнштейна. В дальнейшем теория Эйнштейна-Картана развивалась в направлении перехода от кручения к спину. И этот путь действительно мог привести к полноценной Единой теории поля. Но трудностей на нем было бы даже больше, чем при переделке теорий Вейля и Калуцы-Клейна.

Так вот, спины Единого поля в моей модели – это не столько спины, сколько кручение, поскольку их квантование не упорядочено (его можно определить как беспорядочную

⁸³ И вообще, главным недостатком всех Единых теорий поля является утверждение о единственности нашей Вселенной. Даже теория суперструн со своими дуальностями старается "затолкать" их в нашу Вселенную. Наверное, один только Мультиверс Эверетта свободен от этого недостатка, но его я приберегу для 6-й части.

⁸⁴ Поскольку пространство этой вселенной совпадает с внутренним пространством элементарных частиц. Причем свернуты в данном случае все без исключения измерения, а не только дополнительные!

дискретность). Упорядоченное квантование спинов должно сразу же приводить к их дальнейшему упорядочению в более сложные структуры, т.е. оформляться в перпендикулярное и прямое время. (Именно в этом квантовании должны возникать другие внутренние симметрии частиц). Причем порядок должен быть именно таким: неупорядоченное квантование спинов → упорядоченное квантование спинов → перпендикулярное время → прямое время. Это означает, что теория Эйнштейна-Картана не могла привести к Единой теории поля, поскольку напрямую соединяла кручение с обычным пространством-временем. Такая теория может иметь только прикладное значение в каких-нибудь специальных случаях, встречающихся в природе.

А теперь займемся вторым этапом поисков Единой теории поля, связанным с развитием квантовой теории поля. Разбор "полетов" начнем с механизма Хиггса. Напоминаю, что поле Хиггса – это поле, благодаря которому элементарные частицы получают свои массы. Происходит это в самом начале эволюции нашей Вселенной, когда она только-только возникает из Единого поля. Это возникновение делится на три этапа, в соответствии с отделением от Единого поля фундаментальных взаимодействий. Первым отделяется гравитационное взаимодействие, при этом лептоны и кварки получают массы. Вторым отделяется сильное взаимодействие, при этом массы лептонов и кварков становятся разными. Третьим отделяется слабое взаимодействие, и возникает знакомая нам Вселенная. Все этапы имеют определенную протяженность во времени.

В моей модели эта схема соблюдается только в самых общих чертах. Никаких этапов отделения от Единого поля фундаментальных взаимодействий в ней нет, все происходит сразу и за неопределенное время, поскольку реальное время возникает только при оформленной структуре прямого времени. Сначала возникает единое перпендикулярное время, в котором отсутствует структура прямого времени. При оформлении такой структуры исходное перпендикулярное время делится на два времени, между которыми оформляются отношения относительности прямого и перпендикулярного времени. Именно в этот момент частицы прямого времени обретают массы и начинают свой бег во времени. Причем массы они обретают не на все время своего существования, а только на время своего пробега через настоящее нашей Вселенной или вселенной магнитных зарядов. При переходах между этими вселенными они теряют свои массы и не могут рассматриваться в обычном времени. Механизм Хиггса не учитывает этот факт.

В связи с этим хочу упомянуть гипотезу *техницвета*, которая разрабатывалась именно в качестве альтернативы механизму Хиггса. Идея ее состоит в том, чтобы заменить хиггсовские бозоны составными частицами. Эта идея имеет тот же источник, что и механизм Хиггса, т.е. эффект Мейснера. Как я уже говорил, в этом эффекте сверхпроводящие электроны образуют куперовские пары, взаимодействующие с кристаллической решеткой сверхпроводника, что и приводит к исчезновению сопротивления электрическому току. Если поместить такой сверхпроводник в магнитное поле, то оно изменит свою конфигурацию, будет выталкиваться из внутреннего пространства сверхпроводника. Изменение конфигурации магнитного поля увеличивает его энергию, что равносильно обретению им массы. При этом куперовские пары выступают в роли составных голдстонов, взаимодействующих с этим полем. Роль хиггсова бозона выполняют куперовские пары в поверхностном слое сверхпроводника, сдерживающие проникновение магнитного поля внутрь него.

Гипотеза техницвета предполагает, что цветное взаимодействие кварков может быть

причиной возникновения у них масс. Согласно этой гипотезе, существуют специальные *техникварки*, которые, обмениваясь *техниглюонами*, образуют *техниадроны*. Массы техниадронов намного больше масс обычных адронов. Но некоторые техниадроны не имеют массы – это составные голдстоны, отвечающие за нарушение симметрии техницветового взаимодействия. При объединении таких голдстонов с безмассовыми векторными бозонами получаются массивные частицы. Этот процесс похож на механизм Хиггса. Однако для получения таким образом масс у обычных кварков одного техницвета оказалось недостаточно.

Для решения этой проблемы, было выдвинуто предположение, что группа техницвета является подгруппой группы *расширенного техницвета*, в которую входят как *техникварки*, так и обычные кварки. *Техникварки*, как и обычные кварки, могут образовывать связанные состояния в результате обычного цветового взаимодействия. Обычный кварк может переходить в *техникварк*, испуская "расширенный технимезон". Подсчет массы этого мезона показал, что она должна быть порядка энергии Великого объединения взаимодействий. Получить ее можно за счет введения более сильного техницветового взаимодействия – *сверхтехницвета*. Получается, что вместо одного механизма Хиггса гипотеза техницвета предлагает ввести целую иерархию его эквивалентов, что всегда вызывает сомнение в правильности такого решения.

В моей модели механизм Хиггса и гипотеза техницвета объединяются в одно целое. При этом локальную симметрию в моем варианте механизма Хиггса обеспечивают духовые поля, а спонтанное нарушение этой симметрии – переход наблюдателя в систему отсчета одной из вселенных прямого времени, например, в нашу Вселенную. Роль хиггсова поля в моей модели играет массовое поле будущего нашей Вселенной. Это поле имеет классический непрерывный характер, роль элементарных частиц в нем играет топологическая перегородка (которая также является духом), разделяющая массовые поля нашей Вселенной и вселенной магнитных зарядов и фиксирующая размеры этих частиц в каждой вселенной. Полагаю, что в этом может заключаться смысл самого механизма Хиггса.

В свою очередь, роль технинуклонов в моем варианте техницвета выполняют экзотические нуклоны – "нейтроны" и "протоны", – а роль разных уровней техницветового взаимодействия – разные слои экзотических нуклонов в массовых полях будущего нашей Вселенной и вселенной магнитных зарядов. Уверен, что такое раздвоение техницветового взаимодействия во времени избавляет от необходимости увеличивать количество его уровней. Полагаю, что в этом может заключаться смысл самой гипотезы техницвета – она должна демонстрировать временный характер обретения массы элементарными частицами. А вместе с механизмом Хиггса они должны быть двойственными друг другу.

В связи с этим хочу упомянуть проблему неаддитивности массы в четырехмерной интерпретации СТО (специальной теории относительности) Минковского, которую я рассматривал во второй части. Тогда я сказал, что в этой интерпретации масса тела не увеличивается с приближением его скорости к скорости света, у него увеличивается только кинетическая энергия, но я с этим не совсем согласен. Да, эта масса является постоянной, но не аддитивной величиной. Все классические величины аддитивны. До Минковского считалось, что масса тела в СТО также аддитивна. Именно это мнение легло в основу той интерпретации СТО, в которой масса тела увеличивается на околосветовых

скоростях. Специалисты считают, что эта интерпретация ошибочна, но у нее есть оправдание. Дело в том, что СТО учитывает только такие состояния тел, когда они движутся с постоянной скоростью, и не учитывает их движение с ускорением, когда они переходят из одной инерциальной системы отсчета в другую. Именно этот факт лежит в основе всех парадоксов СТО, включая парадокс близнецов, который я использовал в своей модели. Моя интерпретация этого парадокса также не зависит от ускорения тел, но масса тела в ней аддитивна. При этом движение с ускорением я представил как мгновенный скачок тела из одной инерциальной системы отсчета в другую, от одной постоянной скорости движения, к другой, более высокой. И утверждаю, что у такого тела должна пропорционально увеличиться масса.

Так вот, настоящей интерпретацией этого парадокса является движение нашей Вселенной во времени, в котором элементарные частицы постоянно обретают и утрачивают свои массы. Обретают массы они на границе будущего и настоящего нашей Вселенной, когда совершают скачок из перпендикулярного времени в реальное время, а утрачивают массы они на границе настоящего и прошлого нашей Вселенной, когда совершают скачок из реального времени в перпендикулярное время. Первое можно рассматривать как скачок от абсолютного покоя к движению с определенной (относительной!) скоростью, а второе – как обратный скачок, т.е. от движения с определенной скоростью в абсолютный покой. Такая интерпретация парадокса близнецов учитывает гравитацию (точнее, инерцию), но оставляет ее за пределами рассматриваемых систем отсчета, как и СТО. И она вполне согласуется с эйнштейновской концепцией дефекта массы.

Но вернемся ко второму этапу поисков Единой теории поля. Из того, что я в нем еще не анализировал, осталась только теория Великого объединения взаимодействий. Самыми интересными в ней, конечно, являются ее предсказания. Начну с распада протона. Как я уже говорил, теория Джорджи-Глушоу ограничивает время его жизни $10^{31\pm 2}$ годами. Экспериментальная проверка этого предсказания показала, что время жизни протона больше этого ограничения, из чего еще не следует, что теория не верна. Другие варианты Великого объединения предсказывают большее время жизни протона, но проверить их пока невозможно. Моя модель показывает, что дальнейшая проверка этих предсказаний ничего не даст, пока мы не изменим характер своих экспериментов. Потому что распад протона происходит не в пространстве, а во времени, т.е. за пределами настоящего нашей Вселенной. Обнаружить его можно только в виде техницветового взаимодействия. Например, в виде технинуклонов и технипионов. В моей модели им соответствую экзотические нуклоны и пионы.

То же самое можно сказать о распаде протона в присутствии монополя Полякова-т'Хоофта. Поскольку такой монополь участвует в сильном взаимодействии, то его можно отождествить с магнитным барионом, лептонным партнером которого является наш электрон. А поскольку магнитным партнером протона является заряженный магнитный лептон, то это означает, что протон и монополь Полякова-т'Хоофта представляют две антисимметричные лептонно-барионные структуры, которые при переходах по струне распадаются вместе. И происходят такие распады постоянно, а не через комическое количество лет. Но и не мгновенно, как предсказывали "родители" этого монополя, а по истечении времени между двумя техницветовыми взаимодействиями, одно из которых наделяет протон массой, а другое – лишает ее.

Что касается самого монополя Полякова-т'Хоофта, то его огромную массу можно объяснить тем, что его топологическая природа каким-то образом пересекается с

топологией квантовой гравитации и суперсимметрии. В моей модели эта связь объясняется просто: лептонно-барионной структурой монополя Полякова-т'Хоофта и особенностями его поведения в перпендикулярном времени. В теории этого монополя должны быть духи, а где есть духи, там есть и симметрия перпендикулярного времени. А где есть эта симметрия, там есть и кантовая гравитация.⁸⁷ Гораздо интереснее то, что квантование электрического заряда в теории Великого объединения не зависит от существования этого монополя. Данное квантование следует из симметрии электрических зарядов лептонов и кварков, а с квантованием магнитного заряда ее связывают преобразования изоспина. В моей модели эта проблема объясняется тем, что у монополя Полякова-т'Хоофта отсутствует лептонный партнер. Моя лептонно-барионная структура автоматически обеспечивает взаимосвязанное дробно-целочисленное квантование электрических и магнитных зарядов.

Ну и, наконец, проблема калибровочных иерархий. Как я уже говорил, смысл ее заключается в большом энергетическом интервале между Великим и электро-слабым объединением взаимодействий. Возможным решением этой проблемы считается введение в теорию Великого объединения суперсимметрии, но реалистичные модели такой корректировки этой теории пока не построены. Моя модель позволяет решить и эту проблему, поскольку она "насквозь" суперсимметрична. Таковой в ней является даже симметричная электродинамика, которая не входит ни в Великое, ни в электро-слабое объединение взаимодействий! Хотя дело здесь не в объединении взаимодействий, а в том, что элементарные частицы прямого времени не могут существовать в перпендикулярном времени, и наоборот, суперпартнеры этих частиц могут существовать только в перпендикулярном времени и не могут существовать в прямом времени. В симметричной электродинамике присутствует только духовая часть суперсимметрии, да и та "прячется" за концепцией реального пространства-времени нашей Вселенной. Пока эта концепция соответствующим образом не скорректирована, невозможна даже симметричная электродинамика.

В предыдущей части я показал, что глюонное взаимодействие можно рассматривать как разновидность электромагнитного взаимодействия, обслуживающего дробные электрические заряды. Эйнштейновская гравитация в моей модели обобщает оба этих взаимодействия до симметричной электродинамики. Слабое же взаимодействие является вспомогательным – оно регулирует взаимоотношения настоящего нашей Вселенной с другими моментами настоящего, связанными с другими поколениями кварков. Уверен, что и его можно представить в виде разновидности электромагнитного взаимодействия. Например, как продолжение техницветового взаимодействия дальше в будущее нашей Вселенной.⁸⁸ С этой точки зрения Суперобъединение взаимодействий (она же расширенная супергравитация) – это просто фиксация более высоких квантовых (они же топологические) уровней электромагнитного взаимодействия.

⁸⁷ Интересно, что спин монополя Полякова-т'Хоофта получается из изоспина, и это не нарушает его связь со статистикой. В третьей части я говорил (в абзаце, в котором находится 25-я сноска), что прямое произведение изотопической симметрии и так называемой барбарионной симметрии Липкина равносильно суперсимметрии. То есть изоспин определенно имеет отношение к суперсимметрии. Поэтому в том, что спин монополя Полякова-т'Хоофта получается из изоспина, нет ничего удивительного.

⁸⁸ У меня есть идея, что все эти моменты настоящего могут "накручиваться" друг на друга, как это делает молекула ДНК при спирализации в хромосому. Вполне возможно, что именно так во Вселенной формируется многомерная структура пространства-времени. Одно время на SciTecLibrary я продвигал эту идею...

Третий этап поиска Единой теории поля, связанный с теорией суперструн, анализировать трудно, поскольку он направлялся не практическими экспериментами и наглядными моделями, а теоретическими изысками. Поэтому и информация в ней такая, что я мало что могу из нее извлечь. К примеру, как я уже говорил, суперсимметрия может быть введена в теорию струн пятью различными способами. Но соотносить эти способы с моей моделью я затрудняюсь. Знаю только, что перпендикулярное время в моей модели может быть не одно, и различие между ними будет определяться формой их взаимоотношений с прямым временем. Вряд ли таких времен будет пять, поскольку разные теории суперструн дуальны друг другу, а дуальность – это форма взаимоотношений между прямым и перпендикулярным временем.⁸⁹ Я пробовал сопоставлять взаимоотношения этих теорий со взаимоотношениями прямых и перпендикулярных времен в моей модели, но получилась путаница. Можно было бы, конечно, просто придумать что-то, но без дополнительной информации по данным теориям это было бы наивно. Пока могу сказать только одно – с увеличением количества перпендикулярных времен должно увеличиваться и количество прямых времен. В какой пропорции – пока затрудняюсь сказать.

"Ученые, работавшие с Купером, были обескуражены, они не верили в чудеса, но перед ними был гений, который добивался фантастически результатов и не умел объяснить, как и почему он что-либо делает. И сам Купер тоже был обескуражен, потому что он ясно представлял, не будучи в состоянии хоть как-то помочь, тот грандиозный путь, который предстояло пройти науке до классических экспериментов Жана Вердье, на основании которых великий Антуан Лефевр впоследствии выведет свои фундаментальные уравнения Реальности..."

Айзек Азимов. "Конец Вечности".

Продолжение следует...

⁸⁹ А также между разными вселенными прямого и разными вселенными перпендикулярного времени.