

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ НОВОЙ - ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Хороший пример того, насколько глубоко основатели и творцы современной физической науки чувствовали тонкую диалектику локального и глобального, показывает следующая история, рассказанная В.Гейзенбергом в его творческой автобиографии, совершенно не случайно названной именно "Часть и целое". Большой любитель дальних пешеходных прогулок, он был приведен однажды Н.Бором к развалинам старого замка на берегу моря. Полюбовавшись вместе зеленью растительности, пробывшей между старых камней, и бликами солнца в волнах, Бор сказал Гейзенбергу: "Сейчас я скажу всего несколько слов. Ни один камень, ни одна восточка за это время не изменятся. Блеск солнца в волнах также останется тем же самым. Но все восприятие этого места полностью изменится". И после короткой паузы: "Это - Эльсинор. Здесь жил Гамлет". Эффект был действительно потрясающим.

История эта является, по-видимому, почти дзенским коаном, настраивающим даже эмоциональное восприятие современного исследователя именно на "прислушивание" к таким аспектам физической науки, которые до сих пор разрабатывались только фрагментарно, а еще чаще - просто оставались интересными и оригинальными физическими идеями, довольно слабо связанными с систематическим, концептуальным построением физики как научной теории. Сейчас, однако, становится ясным, что наиболее глубокие и фундаментальные физические понятия и идеи всегда связаны и с некоторым нетривиальным подходом к проблеме локального и глобального, целого и части в этой науке.

Введение калибровочных полей

Если мы хотим придать квантовой системе некоторую новую локальную динамическую степень свободы - ввести ее локальное динамическое взаимодействие с некоторым новым физическим полем, нам вовсе не обязательно вводить это поле с самого начала в основные динамические законы - уравнения

движения теории (или соответствующий им лагранжиан, характеризующий всю динамику интересующей нас системы). Мы можем ввести новые, добавочные полевые степени свободы любой квантовой системы и на некоторой последующей стадии ее динамического исследования, заставив локально изменяться от точки к точке пространственно-временного континуума фазу ее полной волновой функции. Такие локальные, определенным образом согласованные друг с другом - "координированные" по некоторому теоретико-групповому "закону" изменения фазы динамически, оказывается, полностью эквивалентны "включению" в нашей системе совершенно нового локального векторного поля, как бы "компенсирующего" своим действием локальные изменения фаз волновой функции (поэтому калибровочные поля часто и называют "компенсирующими"). Эта фундаментальная физическая идея¹ и лежит в наши дни в основе всех современных теорий сильных (ядерных) и "электрослабых" взаимодействий на уровне элементарных частиц.

Подобного рода важную локальную инвариантность физических систем в качестве нового фундаментального динамического принципа физики использовал впервые еще А.Эйнштейн - при создании общей теории относительности. Это и позволило ему локально трактовать в принципе эквивалентности поле тяготения чисто кинематически - как переход в некоторую новую, локальную ускоренную (относительно исходной) систему отсчета. Тысячи и тысячи физиков многократно, но только чисто формально осуществляли переход (в конкретных расчетах) от одной калибровки волновой функции к другой, обусловленный включением внешнего электромагнитного поля. Но только Ч.Янг и Р.Миллс догадались в 1954 г., что всегда и повсюду любое изменение фазы волновой функции квантовых систем должно иметь место только локально и поэтому может распространяться только от одной окрестности точки к другой ее окрестности. А на языке квантовой теории поля это и означает появление совершенно новой динамической степени свободы, некоторого нового векторного поля нулевой массы.

До Ч.Янга и Р.Миллса считалось, что координированное (например, одинаковое) изменение фазы волновой функции можно пр. извести сразу - одновременно во всех точках пространства - и даже в таких, которые отделены друг от друга пространственно - подобным интервалом. Но это явно противоречит

¹ Янг Ч., Миллс Р. Сохранение изотопического спина и изотопическая калибровочная инвариантность // Элементарные частицы и компенсирующие поля. М., 1964. С. 28.

исследуемому нами в этом параграфе фундаментальнейшему физическому принципу локальности - принципу близкодействия, являющемуся, фактически, уточненной современной топологической экспликацией философского принципа причинности. Здесь надо особо подчеркнуть, что в современной его трактовке именно локальность изменения фаз волновой функции квантовых систем ведет к появлению совершенно новых типов полевых взаимодействий - калибровочных. Глобальные свойства симметрии волновых функций в целом предполагают трансформации их, одинаковые (и постоянные) во всех точках пространства и времени, и не дают новых "сил" локального типа. Если же в различных пространственно-временных точках трансформации фаз волновой функции квантовой системы будут независимы и к тому же изменяться по определенным теоретико-групповым законам, это и будет локальная калибровочная симметрия, совершенно эквивалентная динамически введению нового локального безмассового векторного-компенсирующего эти изменения фаз волновой функции (калибровочного) поля.

Конечно, калибровочные "силы" не являются поэтому, строго говоря, совсем уж классически "локальными" - ведь они всегда обусловлены некоторой целостной, глобальной волновой функцией всей исследуемой квантовой системы. В каком-то смысле они, по-видимому, даже представляют собой промежуточный, гибридный тип "сил" - и не совсем локальных, но и не совсем уж глобальных. Более того, они как бы осуществляют "непрерывный переход" от чисто локальных взаимодействий (каковыми являются, например, обычные электромагнитные "силы", на которых впервые и была, как известно, обнаружена калибровочная инвариантность полной волновой функции квантовых объектов) к взаимодействиям системного, глобально-целостного типа, о которых подробно речь пойдет в следующем параграфе. Калибровочные поля, таким образом, позволяют провести наиболее основательный и тщательный анализ² сложного взаимоотношения локальных и глобальных свойств в наиболее общих типах динамических взаимодействий, изучаемых современной физикой, - взаимодействий, имеющих место как на очень малых расстояниях, внутри адронов, так и протекающих на огромных дистанциях типа межгалактических расстояний.

Именно калибровочные (компенсирующие) поля, как уже говорилось выше, наиболее глубоко вскрывают некоторую со-

² Коноплева Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. М., 1972.

вершено новую, вообще говоря, уже обобщенно-пространственную, локальную природу внутреннего единства всех видов взаимодействия элементарных частиц между собой - сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных. Как известно, и эксперимент, и теория физических процессов при очень больших энергиях показывают все более и более явно в последние годы, что ставшее уже традиционным разделение взаимодействий элементарных частиц по их силе имеет место только в области достаточно небольших энергий. С ростом же энергий слабые взаимодействия становятся все сильнее и сильнее и могут даже сравняться с электромагнитными, а сильные взаимодействия - "слабеют" и могут по порядку величины приблизиться к "усилившимся" при больших энергиях электромагнитным. Пройти это может, правда, только при совершенно гигантских концентрациях энергии на отдельных частицах в 10^{18} ГэВ - таких энергий пока что не наблюдалось даже в космических лучах, самом высокоэнергичном источнике излучений, известном человеку.

Подобная, прямо скажем, совершенно дикая концентрация энергий на отдельных элементарных корпускулах имела место, по-видимому, только в самые первые доли секунды после гигантского "Большого Взрыва", породившего все многообразие известных нам сейчас объектов Вселенной. Так что глубокие теоретические проблемы внутреннего единства природы всех взаимодействий элементарных частиц переходят здесь в не менее глубокие космологические проблемы их общего, единого исторического происхождения: калибровочные поля, оказывается, совсем не изменяют своей внутренней "природы" в совершенно колоссальном диапазоне энергий и промежутков времени, меняя, правда, иногда спонтанно свойства своей внутренней симметрии, что приводит при определенных критических значениях энергий, расстояний и промежутков времени к их довольно сильным трансформациям, перестройкам в отношении силы, радиуса действия и т.п. Но глубокая внутренняя - локальная природа калибровочных взаимодействий остается при этом неизменной.

Такие аспекты поведения калибровочных полей позволяют обнаружить некоторые новые и - очень глубокие стороны общепрограммированного единства физики элементарных частиц и, например, теории твердого тела, квантовых жидкостей, плазмы и статистической физики вообще. Это обеспечивает весьма и весьма плодотворное взаимообогащение этих разделов современной физики унифицирующими идеями, едиными методами и обобщающими концепциями.

Так, еще в квантовой электродинамике "реальный" физический вакуум (в частности, и благодаря свойствам калибровочной инвариантности электромагнитных взаимодействий) оказывался подобным очень ярко выраженному "диэлектрику", весьма и весьма сильно "экранирующему" - благодаря интенсивной поляризуемости вблизи "самих" зарядов процессов виртуального рождения электронно-позитронных, протон-антипротонных и других пар заряженных корпускул - бесконечно большие "голые" (до перенормировки) заряды исходных частиц. И по мере роста энергий пробных корпускул - по мере "приближения" их взаимодействий к самым "центрам" исходных зарядов - постепенно росла и "сила" электромагнитных взаимодействий.

Иные локальные теоретико-групповые - калибровочные свойства сильных и слабых взаимодействий - в отличие от электромагнитных - ведут к тому, что физический вакуум этих полей в различных моделях и физических ситуациях калибровочных взаимодействий может вести себя³ и как сверхтекучая жидкость (модель Голдстоуна), и как сверхпроводник (модели Намбу и Иона-Ласинио, Вакса и Ларкина и др.) и даже как проводящая плазма (модели Хиггса и Вайнберга-Салама). В этом последнем случае, в частности, калибровочный аналог дебаевского экранирования дальнедействующих кулоновых сил зарядов и ведет к появлению в конце концов очень короткодействующих сил, физически проявляющих себя именно как слабое взаимодействие. А по мере роста энергий исследуемых процессов происходит - на определенном энергетическом рубеже восстановление полной группы локальных калибровочных симметрий физических полевых взаимодействий (спонтанно очень сильно нарушенных при малых энергиях).

Тем самым, чисто локальные свойства калибровочных симметрий определяют уже глобальные, справедливые для всей Вселенной в целом характеристики относительной "силы" сильных - ядерных, электромагнитных и слабых - распадных взаимодействий и самое главное - тенденции их изменений с ростом энергий. Так получается, что различие локальных калибровочных симметрий влечет сначала различие локальных свойств физического вакуума, электромагнитных и слабых взаимодействий на различных расстояниях: для процессов, разрывающихся на расстояниях до 10^{-13} - 10^{-16} см, вакуум калибровочных полей не меняет заметным образом своих свойств. Но на расстояниях ме-

³ Гриб А.А. Проблема неинвариантности вакуума в квантовой теории поля. М., 1978. С. 5 и далее.

нее 10^{-16} см очень резкое изменение его "экранирующих" свойств как реальной физической "сплошной" среды уже ведет к локальному отождествлению" друг с другом электромагнитных и слабых "сил" - на таких расстояниях они становятся физически неразличимыми и полностью превращаются друг в друга.

Аналогичное локальное изменение на еще меньших расстояниях экранирующих свойств физического вакуума калибровочных полей, переносящих сильные - ядерные взаимодействия, ведет к тому, что образно говоря, пространство "внутри" адрона (нуклона или гиперона) становится подобным сверхпроводнику. Мы приводим для специалистов целый ряд возникающих при этом физически очень интересных аналогий:

Асимптотическая свобода: Взаимодействие электрона с кристаллической решеткой; Притяжение глюона к глюону; Притяжение электрона к электрону (благодаря этим взаимодействиям); Нулевая масса "голого" глюона; Существование "голой" поверхности Ферми; Неустойчивость "голого" вакуума; Неустойчивость "голой" поверхности Ферми; Многоглюонные связанные состояния; Замкнутые петли токов Куперовых пар.

Исследования здесь еще продолжают, но общее направление их подсказывает, что с ростом энергий физических процессов (и соответственно - с переходом ко все меньшим расстояниям) физический вакуум сильных калибровочных взаимодействий также постепенно меняет свои "экранирующие" свойства. Это ведет к постепенному, логарифмическому уменьшению (с ростом энергий и уменьшением исследуемых расстояний) эффективной константы сильных взаимодействий, которая где-то в области сверхгигантских энергий в 10^{15} ГэВ и сверхкоротких расстояний 10^{-29} см делается равной растущей с энергией эффективной константе "электрослабых" взаимодействий. Если предложенные до сих пор варианты теории "Великого объединения" содержат хотя бы элементы истины, это означает, что единое для всей Природы, так сказать, "гранд-унифицирующее" калибровочное взаимодействие испытывает при таких длинах и энергиях еще одно очень сильное спонтанное нарушение локальных свойств калибровочной симметрии, приводящее к разделению сильных - ядерных и "электрослабых" сил во всем Космосе.

Еще одна очень важная особенность калибровочных полей, физически очень отличающая их от всего, что до сих пор было исследовано в теории поля, - их нелокальность. Для ураний компенсирующих калибровочных полей это значит, что далеко не все их даже классические решения допускают достаточно однозначную квантовомеханическую интерпретацию, например, в

виде определенных наборов элементарных частиц. Только специальные конфигурации калибровочных полей, имеющие так называемую плоскую асимптотику, могут быть ныне истолкованы - согласно принципу соответствия, - например, как определенные, локализованные, устойчиво распространяющиеся возбуждения поля (солитоноподобные решения). Еще более необычны физические свойства инстантонных квантовых состояний калибровочных полей, которые представляют собой результат подбарьерного - туннельного "просачивания" калибровочного вакуума нетривиальной топологической природы в наш обычный, считающийся (пока что) топологически тривиальным физический вакуум. Все известные нам сегодня элементарные частицы (или, по крайней мере, некоторые из них - адроны) могут оказаться связанными "локально" - "внутри" - с именно такими инстантонами - существенно квантовыми результатами глобального "влияния" (посредством квантовых калибровочных полей) на нашу Вселенную (считающуюся пока что имеющей топологически тривиальную структуру) других - топологически очень и очень не тривиальных Вселенных.

Новые аспекты локальности: "слоения" движения и локализации по Морита

Важнейший - и даже несколько неожиданный результат физики последних лет - это то, что все ее основные динамические уравнения могут быть получены как определенное следствие довольно самоочевидных предположений о "локально-глобальных" аспектах слоения общего многообразия динамических состояний, "движения" исследуемой нами системы - о том, как оно "составлено", "выстроено" из каких-то своих "частей" - подмногообразий меньшей размерности. В этом можно видеть дальнейшее углубление и расширение нашего понимания очень разнообразных (и во многом определяющих детальную динамику любой физической системы) соотношений в ней локальных и глобальных аспектов детерминаций обобщенно-причинного типа, - учитывающих не только метрические, но и другие, более общие способы задания, фиксации окрестностей, наиболее "близких" заданной, интересующей нас в том или ином отношении.

Образно говоря, динамические физические системы наших дней допускают локализации - разложение на составляющие их элементарные "части" несколькими совершенно различными и, главное - никак не сводимыми друг к другу способами. И каждое

такое разложение - каждый новый тип топологической локализации "частей" в системе⁴ - выявляет некоторые совершенно новые стороны глубокого внутреннего единства всей физической науки, а возможно - и всего человеческого познания в целом. Динамические законы физики существенно связаны с объемлющими интересующие нас объекты расслоениями - более "вместительными" обобщенно-пространственными структурами, лишь "частями" которых являются исследуемые нами объекты и их возможные движения. Здесь же мы рассмотрим обстоятельнее разложение самих динамических систем физики на составляющие их "части".

Сопсем недавно К.Тейтельбойм смог показать, что если мы выделим самые различные слоения четырехмерного пространственно-временного континуума на составляющие его "части" - трехмерные, только пространственные гиперповерхности, пересекающие ось времени под различными углами, то лишь очень малое число основных динамических уравнений остается инвариантными относительно следующего, довольно самоочевидного тополого-динамического преобразования. Возьмем две такие трехмерные пространственные гиперповерхности - исходную и конечную, разделенные определенными промежутком времени.

Само собой разумеется, что фундаментальные динамические уравнения физической теории должны давать на конечной гиперповерхности один и тот же физический результат, если мы будем переходить от исходной гиперповерхности к конечной двумя топологически несколько различными способами. В одном из них "левый фланг" гиперповерхности сначала как бы забегает немного вперед по сравнению с ее "правым флангом", а в другом случае наоборот - наша трехмерная пространственная гиперповерхность вперед заходит сначала как бы своим "правым плечом": вперед сначала несколько вырывается ее "правый фланг". Но на конечную гиперповерхность они "прибывают", так сказать, одновременно: в первом случае "левый фланг" гиперповерхности резко замедляет свое движение перед конечной гиперповерхностью (чтобы компенсировать свою, так сказать, излишнюю "резвость" на старте), а во втором - то же делает "правый фланг".

В итоге оказывается, что один и тот же результат на конечной гиперповерхности дают только те динамические уравнения физики, которые мы ныне, в наши дни, связываем с наиболее фундаментальными законами движения материи - уравнения электромагнитного поля Максвелла, уравнения сильных

⁴ Тамура И. Топология слоений. М., 1979. С. 121 и далее.

(ядерных) и слабых (распадных) взаимодействий - описанные выше кратко калибровочные (компенсирующие) уравнения Янга - Миллса и уравнения сильных полей тяготения - уравнения общей теории относительности Эйнштейна. Таким образом, основные динамические уравнения наиболее фундаментальных физических теорий наших дней являются в определенном смысле некоторого рода следствиями чисто топологической локальной "составленности", "выстроенности" полного многообразия динамических состояний исследуемой физической системы из каких-то ее "частей" - возможности локального однозначного разложения ее движения на динамические "слоения", подмногообразия меньшей размерности, все вместе, в сумме составляющие полное многообразие динамических состояний системы.

Динамическая "самосогласованность" внутренней "составленности" движения исследуемой физической системы из самых различных его "частей" (в различные моменты времени) однозначно определяет - вполне естественным образом - конкретный вид основных законов "поведения" элементарных физических объектов (материальных точек, векторов напряженности и т.д.), составляющих эту систему. Топологические понятия и структуры впервые позволяют ныне исследовать эту внутреннюю самосогласованность "различных разложений движения на его части" исключительно эффективным образом - так, что исходя из нее можно получить основные динамические законы некоторых разделов современной физики.

Хотя чисто внешне, поведение какого-нибудь гироскопа в кардановом подвесе или сложного волновода поражает именно своей иногда даже полной непредсказуемой целостностью и системностью, на самом деле за всем этим ничего не стоит, кроме предельно локальных причинно-динамических законов и определенных граничных (и начальных) условий. "Системность" (подлинная) физических объектов здесь фактически почти полностью исключена - за счет осуществимого "полного и без остатка" погружения всех их даже только возможных состояний движения в обычное метрическое, евклидово пространство достаточно большого числа измерений. Эта предельная "разложимость" любых - даже и вполне системных структур и объектов классической физики на свои наиболее элементарные "части" (материальные точки, вектора напряженности поля и т.д.) - далеко не тривиальный физический факт, заслуживающий специального рассмотрения.

Выбор абстрактного математического пространства, "окрестностная" локализация в котором дает в физике наиболее

плодотворные теоретические результаты, определяется, вообще говоря, новыми и важными понятиями так называемых теорем Морита - I, II и III - эквивалентности. Самый простой случай здесь - теорема о "Морита - I - эквивалентности", в которой рассматривается почти тривиальный пример эквивалентности друг другу многомерных векторных пространств и их обобщений - модулей, в которых, образно говоря, по различным координатным осям "откладываются" уже не числа (как в векторных пространствах), а их алгебраические обобщения - абстрактные кольца. Так вот эти многомерные векторные пространства (и модули) оказываются, в определенном смысле, эквивалентными друг другу, если эквивалентны их системы эндоморфизмов (внутренних их преобразований самих в себя).

Физика уже на самых первых этапах своего становления - неявно и неосознанно - использовала локально "Морита I - эквивалентность": абстрактные пространства перемещений любых макроскопических тел оказываются локально тривиальным образом эквивалентны друг другу - и обычному трехмерному евклидову пространству - именно потому, что наиболее общей системой их внутренних преобразований являются эквивалентные галилеевы преобразования различных инерциальных систем отсчета друг в друга. Далее, понятия фазового объема в статистической физике, векторов напряженности электрического и магнитного поля в теории поля, непрерывно изменяющейся метрики четырехмерного пространственно-временного континуума в общей теории относительности, совершенно неклассической гильбертовой "геометрии" квантовых состояний и наблюдаемых в квантовой механике - как точные обобщения наших интуитивных повседневных пространственных образов столь много дают для единого локального-обобщенно-геометрического (и количественного) объяснения физических процессов именно потому, что все они, так сказать, "Морита I - инвариантны". Все они допускают локальное "погружение" и очень плодотворную для всей теоретической физики "окрестностную" локализацию в соответствующем многомерном (и даже бесконечномерном типе - гильбертовом, квантовомеханическом) пространстве только потому, что характеристические системы эндоморфизмов этих пространств, по крайней мере, локально, "отражают" основные физические свойства инвариантности исследуемых объектов (теорема Лиувилля о сохранении фазового объема в статистической физике, преобразования Лоренца в электродинамике, любые непрерывные преобразования координат в общей теории относитель-